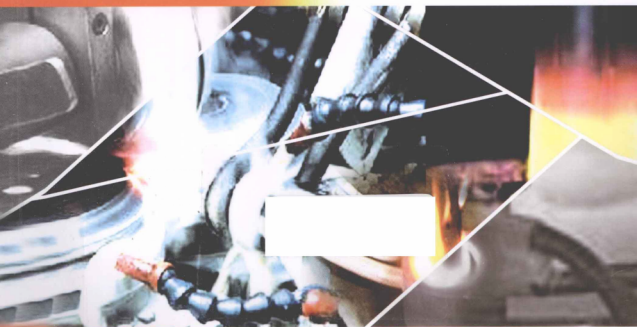


钎焊及扩散焊技术

QIANHAN JI KUOSANHAN JISHU

王娟 刘强 等编著



化学工业出版社



钎焊及扩散焊技术

QIANHAN JI KUOSANHAN JISHU



www.cip.com.cn
专利检索 上海工社网



销售分类建议：机械/焊接

ISBN 978-7-122-16007-2



9 787122 160072 >

定价：69.00元

钎焊及扩散焊技术

王 娟 刘 强 等编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书从理论与实践相结合的角度,对钎焊及扩散焊方法、各种材料的钎焊及扩散焊特点及工艺要点等做了系统的阐述,注重科学性、先进性和新颖性等特色。本书内容反映出近年来钎焊及扩散焊技术的新进展,特别是一些新工艺、新型焊接用材料的开发。此外,本书包含了钎焊及扩散焊技术在航空航天、电子、汽车制造、石油化工、家用电器等领域大量的应用实例,突出了其实用性。

本书内容反映了当前钎焊及扩散焊技术的应用现状,主要供从事与材料开发和焊接技术相关的工程技术人员使用,也可供高等院校师生、科研院所(所)和企事业单位的科研人员参考,还可作为高等学校材料成形及控制工程、材料加工工程专业(焊接方向)师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

钎焊及扩散焊技术/王娟,刘强等编著. —北京:化学工业出版社,

2013.1

ISBN 978-7-122-16007-2

I. ①钎… II. ①王…②刘… III. ①钎焊②扩散焊 IV. ①TG454
②TG453

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 295497 号

责任编辑:周红

文字编辑:陈喆

责任校对:洪雅姝

装帧设计:韩飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张17 字数447千字 2013年3月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:69.00 元

版权所有 违者必究

前 言

随着航空、航天、核能和电子等新技术的飞速发展，以及新材料、新结构的采用，对连接技术提出了更高的要求，钎焊及扩散焊技术因此受到人们更多的关注，开始以前所未有的速度发展并出现了许多新的钎焊及扩散焊工艺，钎料品种日益增多，有力地促进了国家经济建设事业的腾飞。

钎焊及扩散焊技术作为实现材料连接的重要方法，以其独有的特点在难以熔焊材料的构件焊接中得到了广泛的应用，获得了优质或与母材相匹配的高性能接头。与此同时，也面临着许多新的技术难题，这些难题成为促进其进一步发展和应用，并在各行业领域发挥更大作用的巨大动力。

本书从理论与实践相结合的角度，对钎焊及扩散焊方法、各种材料的钎焊及扩散焊特点及工艺要点等做了系统的阐述，注重科学性、先进性和新颖性等特色。本书内容反映出近年来钎焊及扩散焊技术的新进展，特别是一些新工艺、新型焊接用材料的开发。此外，本书包含了钎焊及扩散焊技术在航空航天、电子、汽车制造、石油化工、家用电器等领域大量的应用实例，突出了其实用性。

本书内容反映了当前钎焊及扩散焊技术的应用现状，主要供从事与材料开发和焊接技术相关的工程技术人员使用，也可供高等院校师生、科研院（所）和企事业单位的科研人员参考，还可作为高等学校材料成形及控制工程、材料加工工程专业（焊接方向）师生的教学参考书。

参加本书编写和提供信息的人员还有：李文娟、刘鹏、马海军、蒋庆磊、夏春智、陈茂爱、孙俊生、刘如伟、高进强、秦国梁、吴娜、沈孝芹、黄万群、张蕾、李嘉宁、郑德双、许有肖、刘毅、杜红燕、赵康培、兰亚洲、张鹏飞、孙建雄、马群双、王继腾、艾铭杰、许红等。

本书编写过程中参阅了相关文献资料，在此，表示衷心的感谢。

由于编者水平所限，书中不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 钎焊的特点及接头形成	1
1.1.1 钎焊的特点	1
1.1.2 钎料与母材的相互作用	1
1.1.3 影响钎焊过程的因素	4
1.1.4 钎焊方法的分类	4
1.2 扩散焊原理及分类	7
1.2.1 扩散焊的原理	7
1.2.2 扩散焊的特点	7
1.2.3 扩散焊的分类	8
1.3 钎焊及扩散焊技术的新发展	9
1.3.1 钎焊技术的新发展	9
1.3.2 扩散焊技术的发展现状	10
1.3.3 钎焊及扩散焊技术的应用	12
第 2 章 钎料与钎剂	14
2.1 钎料的类型及特点	14
2.1.1 对钎料的基本要求	14
2.1.2 钎料的类型及化学成分	14
2.2 钎料的选用及特性	22
2.2.1 钎料的选用原则	22
2.2.2 常用钎料的特性及用途	24
2.3 钎焊用钎剂	28
2.3.1 对钎剂的基本要求	28
2.3.2 钎剂的类型及特性	28
2.3.3 钎剂与钎料的搭配	33
2.4 钎焊材料的使用及安全	34
2.4.1 钎焊材料的使用	34
2.4.2 钎焊材料的安全注意事项	35
第 3 章 火焰钎焊	36
3.1 火焰钎焊的特点及设备	36
3.1.1 火焰钎焊的特点及应用	36
3.1.2 火焰钎焊设备	37
3.2 火焰钎焊用气体及钎料	45
3.2.1 火焰钎焊用气体	45
3.2.2 钎料及钎剂	47
3.3 火焰钎焊工艺	48
3.3.1 接头设计及表面处理	48
3.3.2 钎焊火焰的控制	48
3.3.3 火焰钎焊操作要点	50
3.3.4 管路构件的火焰钎焊	51
3.4 火焰钎焊的安全与防护	54
3.4.1 乙炔的燃烧爆炸特性	54
3.4.2 液化石油气的燃烧爆炸特性	56
3.4.3 电石和乙炔发生器的安全要求	57
3.4.4 气瓶的安全使用	59
第 4 章 感应钎焊	62
4.1 感应钎焊的特点及应用	62
4.1.1 感应钎焊的特点	62
4.1.2 感应钎焊的应用	63
4.2 感应钎焊设备	65
4.2.1 感应设备的组成及作用	65
4.2.2 感应钎焊机	68
4.3 感应钎焊工艺	69
4.3.1 感应钎焊接头设计	69
4.3.2 感应钎焊用钎料和钎剂	70
4.3.3 钎焊工艺参数	72
4.3.4 导管接头的安装式感应钎焊	74
4.4 感应钎焊操作安全与防护	75
4.4.1 高频电磁场对人体的危害及防护	75
4.4.2 感应钎焊操作的安全事项	76
第 5 章 真空炉中钎焊	77
5.1 真空钎焊接头的形成及设备	77
5.1.1 真空钎焊接头的形成	77

5.1.2 真空钎焊的特点	78	5.3.2 钎焊前清理和表面准备	89
5.1.3 常用的真空钎焊设备	78	5.3.3 焊件的装配与定位	92
5.2 真空钎焊用钎料	82	5.3.4 钎焊工艺参数的选择	94
5.2.1 真空钎焊对钎料的要求	82	5.3.5 真空扩散钎焊	97
5.2.2 真空钎焊常用钎料	82	5.4 真空钎焊质量控制	98
5.2.3 钎料的工艺性能	85	5.4.1 影响钎缝质量的因素	99
5.3 真空钎焊工艺	86	5.4.2 钎缝常见缺陷的防止措施	100
5.3.1 钎焊接头设计	86	5.4.3 钎焊接头的质量检验	102
第6章 不同材料的钎焊	106		
6.1 有色金属的钎焊	106	6.3.1 高温合金的类型及应用	146
6.1.1 铝及铝合金的钎焊	106	6.3.2 高温合金的钎焊特点	149
6.1.2 铜及铜合金的钎焊	116	6.3.3 高温合金钎焊用钎料	150
6.1.3 钛及钛合金的钎焊	124	6.3.4 高温合金的钎焊工艺	152
6.1.4 镁及镁合金的钎焊	131	6.3.5 高温合金的大间隙钎焊	155
6.2 钢铁材料的钎焊	136	6.4 高硬度耐磨材料的钎焊	157
6.2.1 碳钢和低合金钢的钎焊	136	6.4.1 陶瓷与金属的钎焊	157
6.2.2 不锈钢的钎焊	138	6.4.2 硬质合金与钢的钎焊	164
6.2.3 铸铁的钎焊	144	6.4.3 石墨及金刚石的钎焊	171
6.3 高温合金的钎焊	146		
第7章 真空扩散焊	179		
7.1 真空扩散焊设备及工艺	179	7.3.4 镁合金与钛合金的瞬间液相 扩散焊	214
7.1.1 真空扩散焊设备	179	7.3.5 DD3 单晶合金航空发动机叶片的 扩散焊	215
7.1.2 扩散焊工艺及主要参数	180	7.3.6 冷作模具钢与弹簧钢的 扩散焊	217
7.1.3 扩散焊接头常见缺陷及防止	183	7.3.7 35CrMo 石油钻杆的瞬间液相 扩散焊	218
7.2 不同材料的真空扩散焊	184	7.3.8 TP304 钢管的瞬间液相 扩散焊	220
7.2.1 同种材料的扩散焊	184	7.3.9 不锈钢多层薄壁零件的 扩散焊	221
7.2.2 异种材料的扩散焊	187	7.3.10 石墨与 Q345 钢复合板的 扩散焊	223
7.2.3 金属间化合物的扩散焊	195	7.3.11 铝-不锈钢导管过渡接头的 扩散焊	223
7.2.4 复合材料的扩散焊	198		
7.2.5 陶瓷与金属的扩散焊接	203		
7.3 真空扩散焊应用实例	209		
7.3.1 TC4 钛合金板与 304L 不锈钢网的 扩散焊	209		
7.3.2 TA3 多层钛板与 TC4 底座的 扩散焊	211		
7.3.3 Al_2O_3 /TA1 复合加速管的 扩散焊	213		
第8章 钎焊技术应用实例	225		
8.1 在航空航天领域的应用	225	钎焊	227
8.1.1 液体火箭发动机推力室的 钎焊	225	8.1.3 航空压缩机增压器的炉中 钎焊	228
8.1.2 钛合金蜂窝壁板结构的真空		8.1.4 7715D 钛合金喷注器的真空	

钎焊	229	钎焊	250
8.1.5 航空发动机燃油总管的感应 钎焊	230	8.4.3 K _a 波段微带天线的炉中 钎焊	251
8.1.6 发动机涡轮叶片的真空钎焊	230	8.4.4 测井陶瓷探头的真空扩散 钎焊	252
8.1.7 航空发动机压气机静子环的炉中 钎焊	231	8.5 在家电工业中的应用	252
8.2 在电力能源领域的应用	232	8.5.1 电磁换向阀的感应钎焊	252
8.2.1 百万千瓦核电发电机部件的 钎焊	232	8.5.2 冰箱压缩机的火焰钎焊	253
8.2.2 大型发电机定子绕组线棒的感应 钎焊	233	8.5.3 空调器四通阀的钎焊	254
8.2.3 500MW 汽轮发电机水盒的 钎焊	235	8.5.4 电热管的钎焊	255
8.2.4 电站汽轮机顶轴油管的火焰 钎焊	236	8.5.5 空调冷凝器和蒸发器的钎焊	255
8.2.5 HT-7 装置纵场线圈超导接头 的火焰钎焊	237	8.6 在机械加工刀具中的应用	255
8.2.6 水轮发电机定子线圈端部的感应 钎焊	239	8.6.1 硬质合金刀具的火焰钎焊	255
8.3 在汽车制造中的应用	240	8.6.2 金刚石薄壁钻的感应钎焊	257
8.3.1 铝制板翅式换热器的钎焊	240	8.6.3 聚晶金刚石复合片切削齿钻头的 钎焊	258
8.3.2 大型热交换器的埋丝钎焊	243	8.6.4 聚晶金刚石车刀的钎焊	259
8.3.3 转向油罐的火焰钎焊	245	8.6.5 盾构掘进机用特种刀具的感应 钎焊	259
8.3.4 发动机基准轴的感应钎焊	247	8.6.6 矿用截齿的感应钎焊	260
8.4 在电子工业中的应用	248	8.7 在其他行业中的应用	261
8.4.1 波导器件的钎焊	248	8.7.1 低温医疗设备探针的感应 钎焊	261
8.4.2 铜/铝合金 CPU 散热器的 钎焊	248	8.7.2 真空保温杯的真空钎焊	262
参考文献	265	8.7.3 内燃机车叶轮的炉中钎焊	262
		8.7.4 不锈钢过滤毡的钎焊	263
		8.7.5 眼镜架的感应钎焊	264
			265

第1章 概述

钎焊是依靠钎料的熔化、流动和凝固形成致密焊缝、牢固接头的连接方法，在钎焊过程中仅依靠钎料的熔化与母材形成结合；扩散连接是依靠界面原子的相互扩散实现两侧母材结合的精密连接方法。钎焊及扩散连接都属于固态焊接，特别适用于熔焊方法难以焊接的材料，如高硬度材料、热物理性能差别较大的异种材料（如金属与陶瓷、有色金属与钢、金属与玻璃）等，在航空航天、机械工业、汽车制造、核工业、电子电器等部门得到广泛应用。

1.1 钎焊的特点及接头形成

1.1.1 钎焊的特点

钎焊是采用比母材熔化温度低的钎料，采取低于母材固相线而高于钎料液相线的焊接温度，通过熔化的钎料将母材连接在一起的焊接技术。钎焊时钎料熔化为液态而母材保持为固态，液态钎料在母材的间隙中或表面上润湿、毛细流动、填充、铺展、与母材相互作用（溶解、扩散或冶金结合），冷却凝固形成牢固的接头。钎焊接头示意图如图 1.1 所示。

与熔焊方法最大的不同是，钎焊时工件常被整体加热（如炉中钎焊）或钎缝周围大面积均匀加热，因此工件的相对变形量以及钎焊接头的残余应力都比熔焊小得多，易于保证工件的精密尺寸。并且钎料的选择范围较宽，为了防止母材组织和特性的改变，可以选用液相线温度相对低的钎料进行钎焊。钎焊过程中，只要钎焊工艺选择得当，可使钎焊接头做到无需加工。此外，只要适当改变钎焊条件，还有利于多条钎缝或大批量工件同时或连续钎焊。

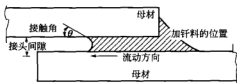


图 1.1 钎焊接头示意图

由于钎焊反应只在母材数微米至数十微米以下界面进行，一般不牵涉母材深层的结构，因此特别有利于异种金属之间，甚至金属与非金属、非金属与非金属之间的连接。这也是熔焊方法做不到的。

钎焊还有一个优点，即钎缝可作热扩散处理而加强钎缝的强度。当钎料的组元与母材存在一定的固溶度时，延长保温时间可使钎缝的某些组元向母材深层扩散，提高钎缝母材间的结合强度。

钎焊的缺点主要在钎料与母材的成分和性质多数情况下不可能非常接近，有时相差较大，例如用重金属钎料钎焊铝，这就难免产生接头与母材间不同程度的电化学腐蚀。此外，钎料的选择和界面反应的特点都存在一定的局限，在钎焊大多数材料时，钎焊接头与母材不能达到等强度，只能用增加搭接面积来改善。

1.1.2 钎料与母材的相互作用

钎焊过程中母材被钎料润湿是保证它们紧密接触并形成良好连接所必需的。润湿条件建立后，毛细现象导致液体钎料流动，起到了使液态金属填充接头间隙的作用。无论润湿性，还是流动性，都受界面间的化学反应和钎料的影响，也受接头形状的影响。钎焊实际上是一

个破膜-溶解-渗透-润湿-铺展-凝固复杂交错的过程。

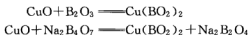
(1) 表面膜及其去除机制

熔态钎料和固体母材表面总是覆盖一层厚度不等的表面膜，熔态钎料要与母材发生润湿并有效铺展，必须要排除这层表面膜。对于纯金属，该金属与周围气氛所产生的结合产物（膜）的稳定性取决于膜的结构和存在的条件。亲氧的金属铝、钛、铍、镁等，它们的表面膜主要是氧化物。另一些金属如铜、铁等，它们除与氧结合外，还与 CO_2 有相当的亲和力，表面层中常发现有碱式碳酸盐存在。两性金属如锡、锌等表面层常存在 $\text{Sn}(\text{OH})_2$ 或 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 等。

表面膜的结构决定膜的致密度。一般情况下，结晶度低或者无定形结构的表面膜具有较大的致密度，这种情况下，加热可促进表面膜的增厚。用酸或碱能有效地溶去这层表面膜。但干净表面与周围气氛反应速度如果很大，新的表面膜又会立即生成，例如铝、镁、钛等活泼金属。铜的氧化反应速度较低，清洗后则可以保持较长时间的赤裸表面。因此从钎焊角度来说，用酸或碱清洗金属表面，主要是为了除去因长时间储存留下的厚氧化皮。过度的清洗将使表面出现微坑。

母材表面膜的脱落或去除是钎焊过程的一个重要环节。在钎剂的作用下，表面膜脱除的机制有溶解、剥落、松动或被流动的钎料推开等过程。对于不同的母材，表面膜的去除机制会有所侧重，有的是两种并重，有的甚至四种作用兼而有之，使钎焊过程最终得以完成。

在较高温度下钎焊铜合金或铁合金时，其钎剂的主成分是硼酸酐 B_2O_3 。熔融态硼酸酐对过渡金属的氧化物有很大的溶解度，并且溶后呈现不同的颜色。在钎焊铜合金时，表面膜与硼酸酐或硼砂产生下列反应：



并溶于过量的硼酸酐之中，依靠溶解作用去除表面氧化膜。

多数合金表面膜的脱除不是一个简单溶解机制，在一些含 Cr、Ti、W、Mo 的合金钢或耐热钢钎焊时，尽管在 B_2O_3 中加入氟化物增强钎剂的活性也不足以脱除表面膜。在钎焊高铬合金时，甚至在钎剂中加入 Al-Cu-Mg 合金以增强活性。

在钎剂的作用下，一旦钎焊过程开始，往往在几秒至几十秒钟内便完成，除非表面膜在钎剂中以极快的速度溶解（例如高温下 CuO 在 B_2O_3 中的溶解）。一些不用钎剂而在空气中进行的钎焊，往往靠钎料中的挥发组元在加热时与表面膜反应，将其还原破坏或从母材表面膜的破隙渗入膜下，再由它和母材的互溶与润湿以及钎料的流动来推开氧化膜。例如用 Cu-P 钎料钎焊铜、锌基钎料钎焊铝合金等。

真空钎焊时金属表面膜的破坏，对不同的金属合金其机制是不同的。微量还原性气氛的存在对纯铜表面氧化膜起到了还原作用。在真空条件下，钛的氧化膜在温度高于 700°C 时强烈地溶入钛中，有效去除了氧化膜。另一些情况是金属表面膜在真空中加热时发生破裂，熔态钎料由裂缝渗入而润湿母材。真空钎焊不锈钢时，温度超过 900°C ，其本身所含的碳即足以使氧化膜被还原而破坏；而真空钎焊铝时，微量 Mg 蒸气对铝氧化膜可以起到置换与破坏的作用。

(2) 熔态钎料与固体母材的润湿

一滴液体在固体表面润湿时，如图 1.2 所示。理想情况下，在固体、液体和蒸气相之间没有化学反应，并且重力因素被忽略。液滴被假定处于表面自由能条件下所确定的平衡状态，这些液滴的形状是由润湿角 θ 唯一特征值决定。在液体蒸汽压 (γ_{LV})、固体蒸汽压 (γ_{SV}) 和固液相蒸汽压 (γ_{SL}) 的条件下，润湿角与表面自由能的关系如下：

$$\cos\theta = (\gamma_{SL} - \gamma_{SV}) / \gamma_{LV}$$

润湿与不润湿的分界线是 $\theta = 90^\circ$ ，当 $\theta < 90^\circ$ 润湿发生，而 $\theta > 90^\circ$ 不发生润湿。 $\theta = 0^\circ$ 表

示液固完全润湿； $\theta=180^\circ$ 视为完全不润湿。对于大多数钎焊，润湿角 θ 取 $10^\circ\sim 45^\circ$ 。

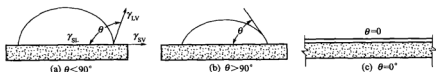


图 1.2 液体在固体表面的润湿

熔态钎料与母材间如有一定的反应性，通常能够很好地润湿，反之则较难润湿。然而影响润湿最主要的因素是互溶度。例如液态 Zn 和固体的 Al 在 500°C 有近 30% 的溶解度，它们润湿得很好。液态 Pb 和固态 Al 在 500°C 时几乎完全没有互溶度，它们极难润湿。类似的情况如液态 Ag 在 1200°C 时与 Fe 的互溶度几乎为零，而 Cu 在同样的温度下能溶解 5% 的 Fe。但如在 Ag 中加入一定比例的、能与 Fe 互溶的 Cu 或 Zn 形成合金，则大大改善了这种银合金与母材 Fe 间的润湿性。特别是加入 Pd，由于它和 Fe、Co、Ni、Cu、Ag、Au 等金属不但在液相，而且在固相也有完全的互溶度，能增加润湿性。

(3) 熔态钎料在固体母材上的铺展

熔态钎料润湿母材以后，它们之间应该有适当的物理的或化学的反应性，才有利于熔态钎料在母材上的后续铺展。否则尽管用了活性很强的钎剂，并不一定会很好地在母材上铺展。例如纯 Sn 在钎剂作用下润湿 Cu 母材以后就很难再顺利铺展，其原因在于熔态钎料与母材之间特殊的相关系。这种难再铺展的现象往往发生在熔态钎料与母材间产生过渡和快速的相间反应，如生成金属间化合物，从而阻碍了熔态钎料向前流动和铺展。显然，要想增加 Sn 在 Cu 上的铺展性，就必须抑制 Cu-Sn 金属间化合物的生长。一个有效的办法就是往 Sn 中添加能与 Sn 合金化的元素，如 Pb、Bi 等。这些元素既能与 Sn 合金化形成熔化温度更低的合金，同时此元素还要与 Cu 之间在一定的温度区间内是惰性的，不产生物理或化学反应。这样，由于这些元素的加入降低了 Sn 在整个合金中的浓度，合金的铺展性因而会大大提高。

有些情况下，仅仅从合金的角度考虑钎料在母材上的铺展性，因受到金属本性的约束，可以控制的余地实在不大，重要的是还应该从钎剂的作用进行考虑。归根结底，提高熔态钎料在母材上的铺展性就是要控制熔态钎料和母材之间应该具有适当的反应性。

(4) 钎料的凝固和钎缝的组织

熔态的钎料在母材狭缝中作毛细流动并形成钎缝时，钎缝的结构是不均匀的。特别是熔态钎料作较长距离流动时尤为突出。对于共晶钎料，因为钎焊温度比共晶点高许多，当熔态钎料一旦润湿母材，母材就开始迅速溶解，钎料的成分也会向母材纵深渗透，在钎料流动过程中，这种作用就依次沿流动的方向发展。最终的钎缝是钎料流入处较宽，终了处钎缝较窄。当采用与母材互溶度较小的钎料钎焊时，钎缝两端宽窄不一的现象并不明显，但常出现钎料中的高熔点组元留在钎料的流入端、低熔点的共晶则流至远端的现象。

为了减少钎焊时钎料的熔化区间，通常总是尽可能选择熔化温度合适、成分接近共晶点或连续固溶体最低熔点的合金当做钎料，例如：用 Ni-Cr 或 Ni-Cr-Si 共晶；用 Cu-Mn、Ni-Mn 连续固溶体最低熔点成分钎料钎焊不锈钢和高温合金；有时也常用纯金属当钎料，例如用纯铜钎焊碳钢等。

为了改善钎料的各种性能，也会在其中添加一些其他少量元素。如果熔态钎料和母材之间的反应性很弱，钎焊后的钎缝常会存在和钎料本身相同的结构。如果熔态钎料和母材有共同的主组元或液相有较大的互溶度，则根据温度的高低和钎焊时间的长短而会出现共晶或亚共晶的钎缝。

钎料中一个组元如果含量较大又能与母材生成金属间化合物,则在钎缝中会出现这些化合物的特征。如果这些金属间化合物是固液共存的,在钎焊条件下常常会呈笋状生长,例如用纯锡或含 Sn 量较高的锡合金钎料钎焊铜、银、铁、钴、镍时,均可看到这种生长方式。这种化合物生成是由一个固相组元(如母材)与液相(钎料)反应生成的,钎焊短时间内生成的化合物都不是纯相,这就减少了作为纯化合物相的属性。此外,这种化合物的笋状生长方式使得它像钉子一样嵌入钎缝,更增加了钎缝的强度。

钎料中一个主要成分组元与母材生成固液同分化合物时,这个化合物往往以层状或连片地生长。这些固液同分化合物通常较脆,又呈层状,会降低钎焊接头强度。这就使选择钎料时,需要特别注意避免生成这类层片状化合物,除非这些化合物能溶入母材,形成组分很宽的固溶体。

1.1.3 影响钎焊过程的因素

影响钎焊过程的因素有接头的设计,钎料、钎剂的选择,以及为了获得所要求特性而采取的工艺参数。这些因素主要影响钎焊接头的外观成形和微观结构,实际上决定了接头的特性。

(1) 接头设计

接头设计的变化对钎焊接头特性的影响充分表现在接头间隙对钎焊接头强度的影响。小的接头间隙,接头强度相当高,钎缝的强度甚至超过母材的强度。接头强度比钎料自身强度高许多的原因是薄的钎料层的截面收缩被抑制。因此,钎料处于非常高的三向应力状态,这将增加它的强度值。但随着接头间隙的增加,抑制收缩的能力减弱或消失,接头强度接近于钎料的自身强度。

(2) 钎料

钎料是复杂的合金,它的熔点在一个温度范围内。如 Ag-Cu 合金,除共晶成分 72% Ag-28% Cu 外,其他如 50Ag-50Cu 合金的熔点在一个温度范围内发生,即温度升至 780℃ 时钎料开始熔化,只有当温度超过 850℃ 时钎料才能全部熔化。因此,在 780~850℃ 温度范围内,有一个液体与固体共存的区域,其润湿和流动性与完全液体的合金在某种意义上截然不同。当钎料金属处于部分熔化的状态时,流动性降低。而低熔点液相在混合状态下,润湿性和扩散行为导致低熔点相具有从固体成分中分离的趋势。这种不充分或不均匀填充接缝的现象会导致缺陷接头的产生。

除了与钎焊钎料熔化特点有关外,钎焊过程中合金化能够出现在液体钎料和母材之间,钎料的润湿性和流动性明显受到合金化的影响。合金化取决于钎料的熔点、母材被影响的程度以及新相形成的趋势。改变钎料成分,可以改变它的熔化特点,靠近接缝表面钎料元素的扩散也会改变母材有效成分。影响母材合金化程度的因素有钎料元素在母材中的溶解度、时间和温度、固态扩散的动力学、母材的晶粒尺寸以及它的成分。母材与钎料的相互作用影响着其润湿性和接头的力学性能。

(3) 残余应力

当必须将两种不同的母材(如碳钢和奥氏体钢、奥氏体钢和陶瓷)钎焊连接在一起时,因为两种材料热膨胀系数的差别,在最终组件中会形成很大的残余应力。从钎焊温度上冷却时,由于接头中一个组件收缩速度与另一个不同,会产生残余应力。当被连接材料的热膨胀系数存在很大差别时,这些残余应力足以在材料上引起局部变形或裂纹,或引起钎焊组件的变形。残余应力可以通过规范钎焊温度和冷却方式来控制,促进应力松弛。

1.1.4 钎焊方法的分类

钎焊有以下几种分类方法。

① 按照所采用钎料的熔点可将钎焊分为两类,钎料熔点低于 450°C 时称为软钎焊;高于 450°C 时称为硬钎焊。

② 按照钎焊温度的高低可分为高温钎焊、中温钎焊和低温钎焊,温度的划分是相对于母材熔点而言。例如:对钢件来说,加热温度高于 800°C 称为高温钎焊, $550\sim 800^{\circ}\text{C}$ 之间称为中温钎焊,加热温度低于 550°C 称为低温钎焊;但对于铝合金来说,加热温度高于 450°C 称为高温钎焊, $300\sim 450^{\circ}\text{C}$ 之间称为中温钎焊,加热温度低于 300°C 称为低温钎焊。

③ 按照热源种类和加热方法的不同可分为:火焰钎焊、炉中钎焊、感应钎焊、电阻钎焊、浸渍钎焊、烙铁钎焊及超声波钎焊等。

④ 按照去除母材表面氧化膜的方式可分为:钎剂钎焊、无钎剂钎焊、自钎剂钎焊、气体保护钎焊及真空钎焊等。

⑤ 按照接头形成的特点可分为:毛细钎焊和非毛细钎焊。液态钎料依靠毛细作用填入钎缝的情况称为毛细钎焊;毛细作用在钎焊接头形成过程中不起主要作用的称为非毛细钎焊。接触反应钎焊和扩散钎焊是最典型的非毛细钎焊过程。

⑥ 按照被连接的母材或钎料的不同可分为:铝钎焊、不锈钢钎焊、钛合金钎焊、高温合金钎焊、陶瓷钎焊、复合材料钎焊、银钎焊、铜钎焊等。

常用钎焊方法分类、原理及应用见表1.1。

表1.1 常用钎焊方法分类、原理及应用

钎焊方法	分 类		原 理	应 用
火焰钎焊	氧-乙炔焰		用可燃气体与氧气(或压缩空气)混合燃烧的火焰来进行加热的钎焊,火焰钎焊可分为火焰硬钎焊和火焰软钎焊	主要用于钎焊钢和铜
	压缩空气雾化汽油火焰或空气液化石油火焰或煤气等			适用于铝合金的硬钎焊
炉中钎焊	空气炉中钎焊		把装配好的焊件放入一般工业电炉中加热至钎焊温度完成钎焊	多用于钎焊铝、铜、铁及其合金
	保护气氛炉中钎焊	还原性气氛	加有钎料的焊件在还原性气氛或惰性气氛的电炉中加热进行钎焊	适用于钎焊碳素钢、合金钢、硬质合金、高温合金等
		惰性气氛		
	真空炉中钎焊	热壁型	使用真空钎焊容器,将装配好钎料的焊件放入容器内,容器放入非真空炉中加热到钎焊温度,然后容器在空气中冷却	钎焊含有 Cr、Ti、Al 等元素的合金钢、高温合金、钛合金、铝合金及难熔合金
		冷壁型	加热炉与钎焊室合为一体,炉壁作水冷套,内置热反射屏,防止热向外辐射,提高热效率,炉道密封。焊件钎焊后随炉冷却	
感应钎焊	高频(150~700kHz)		焊件钎焊处的加热是依靠在交变磁场中产生感应电流的电阻热来实现	广泛用于钎焊钢、铜及铜合金、高温合金等具有对称形状的焊件
	中频(1~10kHz)			
	工频(很少直接用于钎焊)			
浸渍钎焊	盐浴浸渍钎焊	外热式	多为氟盐的混合物作盐浴,焊件加热和保护靠盐浴来实现。外热式由槽外部电阻丝加热;内热式靠电流通过盐浴产生的电阻热来加热自身和进行钎焊。当钎焊铝及铝合金时应使用钎剂作盐浴	适用于以铜基钎料和银基钎料钎焊钢、铜及其合金、合金钢及高温合金。还可钎焊铝及其合金
		内热式		
	熔化钎料中浸渍钎焊(金属浴)		将经过表面清洗,并装配好的钎焊件进行钎剂处理,再放入熔化钎料中,钎料把钎焊处加热到钎焊温度实现钎焊	主要用于以软钎料钎焊铜、铜合金及钢。对于钎缝多而复杂的产品(如蜂窝式换热器、电机柜等),用此法优越、效率高

续表

钎焊方法	分 类		原 理	应 用
电阻钎焊	直接加热式		电极压紧两个零件的钎焊处,电流通过钎焊面形成回路,靠通电中钎焊面产生的电阻热加热到钎焊温度实现钎焊	主要用于钎焊刀具、电机的定子线圈、导线端头以及各种电子元件的触点等
	间接加热式		电流或只通过一个零件,或根本不通过焊件。前者钎料熔化和另一零件加热是依靠通电加热的零件向它导热来实现。后者电流是通过并加热一个较大的石墨板或耐热合金板,焊件放置在此板上,全部依靠导热来实现,对焊件仍需压紧	
烙铁钎焊	外热式烙铁		使用外热源(如煤气、气体火焰等)加热	适用于以软钎料钎焊不大的焊件,广泛应用于无线电、仪表等工业部门
	电烙铁	普通电烙铁	靠自身恒定作用的热源保持烙铁头一定温度	
		带陶瓷加热器		
		可调温度		
	弧焊烙铁		烙铁头部装有炭头,利用电弧热熔化钎料	
超声波烙铁		在电加热烙铁头上再加上超声波振动,靠空化作用破坏金属表面氧化膜	适用于铝、铝合金(含 Mg 多的除外)、不锈钢、钴、锗、硅等钎焊	
特种钎焊	红外线钎焊	红外线钎焊炉	用红外线灯泡的辐射热对钎焊件加热钎焊	适于钎焊电子元器件及玻璃绝缘子等
		小型红外线聚光灯		连接磁芯存储器、挠性电缆等
	氙弧灯光束钎焊		用特殊的反光镜将氙弧灯发出的强热光线聚在一起,得到高能量密度的光束作为热源	适于钎焊半导体、集成电路底板、大规模集成电路、磁头、晶体振子等小型器件以及其他微小型件高密度的封装端子
	激光钎焊		利用原子受激辐射的原理使物质受激而产生波长均一、方向一致以及强度非常高的光束,聚焦到 10^5 W/cm^2 以上的高功率密度的十分微小的焦点,把光能转换为热能实现钎焊	适用于钎焊微电子元件、无线电、电信器材以及精密仪表等零部件
	气相钎焊		利用高沸点的氟系列碳氢化合物饱和蒸汽的冷凝汽化潜热来实现钎焊	往印刷电路板上钎焊烧接用的线柱,往陶瓷基片上钎焊陶瓷片或芯片基座外部引线等
	脉冲加热钎焊	平行间隙钎焊法	利用电阻热原理进行软钎焊的方法,以脉冲的方式在短时间内(几毫秒至 1s)供给钎焊所需热量	往印刷电路板上装集成电路块及晶体管等元件
		再流钎焊法	通过脉冲电流用间接加热的方法在被焊的材料上涂一层钎料或在材料间放入加工成适当形状的钎料,并在其熔化瞬间同时加压完成钎焊	在印刷电路上装集成电路块、二极管、片状电容等元器件,以及挠性电缆的多点同时钎焊等
		热压头式再流钎焊法	采用了热压头方式同时吸收了脉冲加热法的优点来实现钎焊	适于将大型的大规模集成电路或漆包线等钎焊到各种基板上
	波峰式钎焊法		钎焊时,印刷电路板背面的铜箔面在钎料的波峰上移动,实现钎焊	作为印刷电路板批量生产钎焊方法
	平面静止式钎焊法		钎焊时,使印刷电路板沿水平方向移动而同时使钎料槽或印刷电路板作垂直运动来完成钎焊	

1.2 扩散焊原理及分类

1.2.1 扩散焊的原理

原子间的相互扩散是实现扩散连接的基础。固态中的扩散有以下几种机制：空位机制、间隙机制、轮转机制、双原子机制等。空位机制、轮转机制、双原子机制的扩散可以形成置换式固溶体；间隙机制可以形成间隙式固溶体，只有原子体积小的元素（如 H、B、C、N 等）才有这种扩散形式。

扩散焊时在外界压力的作用下，被连接界面靠近到距离为 $2\sim 4\text{nm}$ ，形成物理吸附。加工表面微观有一定的不平度，在外力作用下，表面微观凸起部位形成微区塑性变形，被连接表面的局部区域达到物理吸附，这一阶段被称为物理接触形成阶段。

随着扩散焊时间延长，被连接表面微观凸起变形量增加，物理接触面积进一步增大，在接触界面的某些点形成活化中心，这个区域可进行局部化学反应。当原子间相互作用间距达到 $0.1\sim 0.3\text{nm}$ 时，则形成原子间相互作用的反应区域达到局部化学结合。在界面上完成由物理吸附到化学结合的过渡。在金属材料扩散焊时，形成金属键，而当金属与非金属连接时，此过程形成离子键与共价键。

随着时间的延长，局部的活化区域沿整个界面扩展，最终导致整个结合面出现原子间的结合。连接材料界面结合区中再结晶形成共同的晶粒，接头区由于应变产生的内应力得到松弛，使结合金属的性能得到改善。异种金属扩散焊界面附近可以生成无限固溶体、有限固溶体、金属间化合物或共析组织的过渡区。当金属与非金属扩散焊时，可以在连接界面区形成尖晶石、硅酸盐、铝酸盐及其他反应新相。

1.2.2 扩散焊的特点

扩散焊是在固态下实现材料的焊接，属于压焊的一种。与常用压焊方法（冷压焊、摩擦焊等）相同的是在连接过程中要施加一定的压力。扩散焊与熔焊、钎焊方法的加热温度、压力及过程持续时间等工艺条件的对比见表 1.2。

表 1.2 扩散焊与熔焊、钎焊方法的比较

工艺条件	扩散焊	熔焊	钎焊
加热	局部、整体	局部	局部、整体
温度	$0.5\sim 0.8$ 倍母材熔点	母材熔点	高于钎料熔点
表面准备	严格	不严格	严格
装配	精确	不严格	不严格
焊接材料	金属、合金、非金属	金属合金	金属、合金、非金属
异种材料连接	无限制	受限制	无限制
裂纹倾向	无	强	弱
气孔	无	有	有
变形	轻微	强	轻
接头施工可达性	有限制	无限制	有限制
接头强度	接近母材	接近母材	取决于钎料的强度
接头抗腐蚀性	好	敏感	差

一些特殊的高性能构件的制造，往往要求把性能差别较大的异种材料连接在一起，这用传统的熔焊方法也难以实现。为了满足上述要求，作为固相连接方法之一的扩散焊引起人们

的重视。与熔焊、钎焊方法相比,扩散焊在某些方面具有明显的优点,主要表现在以下几个方面。

① 扩散焊接头的显微组织和性能与母材接近或相同,不存在各种熔化焊缺陷,也不存在具有过热组织的热影响区。工艺参数易于控制,在批量生产时接头质量稳定。

② 可以进行内部及多点、大面积构件的连接,以及电弧可达性不好或用熔焊方法不能实现的连接。可焊接其他焊接方法难以焊接的材料。

③ 它是一种高精密的连接方法,工件不变形,可以实现机械加工后的精密装配连接,可获得较大的经济效益。

④ 对于塑性差或熔点高的同种材料,或对于不互溶或在熔焊时产生脆性金属间化合物的异种材料,扩散焊是一种可靠的方法,适合于耐热材料(耐热合金、钨、钼、铌、钛等)、陶瓷、磁性材料及活性金属的连接,在扩散焊研究与实际应用中,有70%涉及异种材料的连接。

扩散焊也存在着被连接表面的制备和装配质量的要求较高、焊接加热时间长易产生晶粒长大、设备一次性投资较大等缺点。

1.2.3 扩散焊的分类

(1) 同种材料扩散焊

通常指不加中间层的两种同种金属直接接触的扩散连接。这种类型的扩散焊,一般要求待焊表面制备质量较高,要求施加较大的压力,焊后接头的成分、组织与母材基本一致。Ti、Cu、Zr、Ta等最易焊接;铝及其合金,含Al、Cr、Ti的铁基及钴基合金则因氧化物不易去除而难以焊接。

(2) 异种材料扩散焊

通常指两种不同的金属、合金或金属与陶瓷、石墨等非金属材料的扩散连接。异种材料的化学成分、物理性能等有显著差异。两种材料的熔点、线胀系数、电磁性、氧化性等差异越大,扩散焊接难度越大。因两种材料扩散系数不同,在扩散结合面上由于冶金反应产生低熔点共晶或者形成脆性金属间化合物,易使界面处产生显微孔洞、裂纹,甚至断裂。

(3) 过渡液相扩散焊

也被称为瞬间液相扩散焊(TLP),是指在扩散焊过程中界面处短时出现微量液相的扩散焊方法。在扩散焊过程中,中间层与母材发生共晶反应,形成一层极薄的液相薄膜,此液膜填充整个接头间隙后,再使之等温凝固并进行相互扩散,从而获得均匀的扩散焊接头。

瞬态液相扩散焊是用一种特殊成分、熔化温度较低的薄层合金作为中间层,放置在焊接面之间,施加小的压力或不施加压力,并在真空条件下瞬间加热到中间层合金熔化,在焊接面间形成均匀的液态薄膜并润湿母材;经过一定的保温时间,中间层合金与母材之间进一步扩散,形成牢固的连接。这种方法尤其适用于焊接性较差的铸造高温合金。

中间合金的成分应保证瞬态液相扩散焊工艺过程顺利进行,即应有合适的熔化温度(为母材熔点 T_m 的0.8~0.9倍),应能使接头区在连接温度下达到等温凝固,不产生新的有害相。

(4) 加中间层的扩散焊

也被称为共晶反应扩散焊,是利用在某一温度下待焊异种金属之间会形成低熔点共晶的特点加速扩散焊过程的方法。在被焊材料之间加入一层金属或合金(称为中间层),这样就可以焊接很多难焊的或冶金上不相容的异种材料,可以焊接熔点很高的同种材料。

中间层合金成分应保证接头性能与母材相近,达到使用要求。一般中间层合金以Ni-Cr-Mo或Ni-Cr-Co-W(Mo)为基,加入适量B(或Si)而构成。如DZ22定向凝固高温合金的

中间层合金 Z2P 和 Z2F; DD3 单晶合金的 D1F 均是这样设计和生产的。有时中间层合金中也适当加入或调整固溶强化元素 Co、Mo、W 的比例。中间层合金的品种有粉状和非晶态箔料, 非晶态箔料的厚度为 $0.02 \sim 0.04\text{mm}$ 。

(5) 超塑性成形扩散焊

它是一种将超塑性成形与扩散焊接组合起来的工艺, 适用于具有超塑性的材料, 如钛、铝及其合金等的焊接。在高温下具有超塑性的金属材料, 可以在高温下用较低的压力实现成形和连接。采用此方法的条件之一是材料的超塑性成形温度与扩散焊温度接近, 在低真空度下完成。在超塑性状态下进行扩散焊有助于焊接质量的提高, 这种方法在航空航天工业中得到应用。

(6) 等静压扩散焊

它是将工件放置在密封的真空盒中利用热等静压原理完成焊接的一种扩散焊工艺。焊前将组装好的工件密封在真空盒或薄的软质金属包中并将其抽真空, 封焊抽气口, 然后将整个密封盒或包置于加热室中进行加热, 利用高压气体与真空盒或包中的压力差对工件施加各向均衡的等静压力, 在高温高压下完成扩散焊过程。这种方法因加压均匀、不易损坏被焊接件, 适合于脆硬性材料的扩散焊。

扩散焊是正在不断发展的一种焊接技术, 有关其分类、机理、设备和工艺都在不断完善和向前发展。

1.3 钎焊及扩散焊技术的新发展

1.3.1 钎焊技术的新发展

钎焊是人类最早使用的材料连接方法之一。除了机械连接方法外, 钎焊或许是最古老的连接技术, 但随着人们不断对自然的了解, 以及材料性能对工艺的影响和科学技术的进步, 尤其是第二次世界大战以后, 由于航空、航天、电子和核能工业的迅速发展, 为满足构件的轻质量、高强度、高刚度、高导电和导热性等, 以及某些恶劣的工况条件(如高温、高压、抗疲劳、耐腐蚀等)和低制造成本的需要, 采用了大量的新材料、新结构、新工艺和新设备, 这就大大推动了钎焊技术的新进展。

(1) 无铅软钎焊技术

2003 年, 欧洲议会和欧盟委员会公布了《报废电子电气设备指令》和《关于在电子电气设备中禁止使用某些有害物质指令》, 要求成员国确保从 2006 年 7 月 1 日开始, 投放于市场的新电子和电气设备不包含铅、汞、镉、六价铬、聚溴二苯醚和聚溴联苯六种有害物质。这一指令的生效在世界范围内引起广泛的响应, 全球同步实现无铅电子组装已经是不可逆转的发展趋势。世界范围内已开发出的无铅钎料合金的种类繁多, 并且已经申报了九百多种无铅钎料成分专利, 这些钎料的成分主要集中在 Sn-Zn、Sn-Ag、Sn-Cu、Sn-Bi、Sn-In 等系列。研究表明, 现有的印刷电路板材料可以与上述无铅钎料兼容; 现有的电子设备经过适当的改造之后可以适用于无铅电子组装; 无铅钎料的力学性能及焊点的热疲劳可靠性亦优于或相当于 Sn-Pb 共晶钎料。无铅钎焊的普及已经是大势所趋, 已经有很多大的公司将无铅钎焊技术使用到了产品中, 例如 Epson 公司、摩托罗拉公司、微软公司等。

(2) 接触反应钎焊技术

利用共晶反应原理进行钎焊的工艺称为接触反应钎焊。近年来, 接触反应钎焊作为一种先进的材料连接工艺而得到越来越广泛的应用。例如, 为了去除 Al 合金散热器等构件生产中烦琐的复合钎料板加工工序, 加拿大 ALCON 公司提出了一种新型的 Al 合金接触反应钎

焊技术,在至少一个被连接基体的表面涂覆 Si 粉和氟铝酸钾的混合物作为钎焊材料,然后将焊件在氮气气氛下加热到 600℃ 左右并保温。加热过程中钎剂在 562℃ 首先发生熔化并溶解 Al 基体表面的氧化膜,从而使 Si 颗粒与干净的 Al 表面发生紧密接触。当温度超过 577℃ 时, Si 颗粒将迅速溶入 Al 基体并形成一层接近共晶成分的 Al-Si 液相。液相在毛细作用下填充接头间隙形成钎缝和圆角,最后在冷却时凝固形成冶金接头。

(3) 熔钎焊新技术

与普通电弧熔化焊相比,熔钎焊电弧热量集中,对薄板及薄壁容器进行钎焊时变形量很小,焊接热影响区小,操作方便,节能高效又易于实现自动化。同时又因其电弧特有的去除氧化膜作用,带电离子、电子的冲击活化作用,因此可以克服钎剂对母材的腐蚀副作用,焊后不用清洗,在生产中得到了广泛应用。

例如奥迪汽车车身框架及零部件制造中使用 MIG 熔钎焊和等离子电弧熔钎焊,不但成形美观,而且解决了镀锌钢板电阻焊电极的粘钎问题和焊核周围锌层的破坏问题。福特公司也使用 MIG 电弧熔钎焊连接镀锌钢板材质的汽车车身、车门以及车门铰链与车身的连接,并开展了镀锌钢板 MIG 熔钎焊工艺优化和钎焊部件的变形试验及分析。美洲豹汽车公司使用 MIG 熔钎焊和 TIG 熔钎焊连接汽车构件,并用此工艺修复撞坏的汽车车身,还利用此工艺连接用于真空密封的法兰盘。除汽车行业外,国内外还将 MIG 熔钎焊应用于中央空调薄壁镀锌管板连接以及薄壁钢管与波纹管的连接。

(4) 新型钎焊材料的开发

随着我国电工业、汽车工业、电子工业的高速度发展,钎焊技术应用越来越广,使得钎焊材料的产量也以每年 20%~30% 的速度递增。钎焊材料的迅速发展主要体现在钎焊材料的研究、开发机构不断增加,生产厂家逐年增多;钎料的品种增多,钎料年产量逐年增加以及钎焊材料标准化工作取得了很大进展。

① 非晶态技术的新突破 钎料的高度合金化,使部分钎料无法按常规方法加工成丝材或带材,限制了这些钎料的应用范围。20 世纪 70 年代中期,非晶态技术在工业发达国家由实验室已走向工业应用,为无法用常规方法加工成形的钎料开辟了新的加工途径。20 世纪 80 年代中期,我国将非晶态钎料应用于生产。近年来在生产技术上有突破,已具备了中小批量生产能力,可以生产出 100mm 宽、0.03~0.05mm 厚的箔带。目前已有 Ni 基、Cu 基、Cu-P、Al 基及 Sn-Pb 五大类 30 多个品种的钎料,可以通过非晶态技术生产。

② 粘带钎料研制成功 粘带钎料是将一些无法用常规方法加工成带材的钎料粉用胶黏剂制备而成的钎料。我国已研制成功粘带钎料的生产技术,通过选用新的胶黏剂及改进制造工艺,提高了黏结性和使用质保期,特别适合于 Ni 基高温钎料的大面积钎焊。

③ Cu-P 系钎料的加工成形技术有突破性进展 Cu-P 系列钎料虽然具有良好的钎焊工艺性能,但是在常温下非常脆,长期以来都是以铸棒使用,给钎焊工作带来诸多不便。经过多年研究,20 世纪 80 年代中期已能拉拔成 $\phi 0.5\text{mm}$ 的丝材。目前这项加工工艺逐渐成熟,许多钎料生产厂家都能生产 Cu-P 系列钎料丝材,这一加工技术的突破为 Cu-P 系列钎料的应用拓宽了市场。

④ 膏状钎料的研究与生产取得多项成果 用于电子行业表面组装技术的软钎焊膏以及用于硬钎焊的膏状钎料近年来已有许多单位陆续研制成功,并有少量产品投放市场。这一领域的市场前景也将十分广阔,因为无论是大量使用的移动电话、计算机还是制冷配件行业,都在大量使用膏状钎料,目前部分还需从国外进口。

1.3.2 扩散焊技术的发展现状

扩散焊是在一定的温度和压力下将两种待焊金属件的焊接表面相互接触,通过微观塑性

变形或通过焊接面产生微量液相而扩大待焊表面的物理接触,使之距离达 $(1\sim5)\times 10^{-5}$ mm 以内(这样原子间的引力起作用,才可能形成金属键),再经较长时间的原子相互间的不断扩散、相互渗透,来实现结合的一种焊接方法。其独到之处在于:焊接头的显微组织和性能与母材接近或相同,在焊缝中不存在各种熔化焊缺陷,也不存在具有过热组织的热影响区;可操作性强,工艺参数易控制,质量稳定、合格率高;零件变形小;可焊接大断面接头;可焊接其他焊接方法难以焊接的材料。特别适合应用于陶瓷、金属间化合物、异种材料的连接。

近年来,随着真空扩散焊接技术装备日近完备,成本倍率地下降,应用范围日益广泛,如采用超塑成形扩散连接(SPF-DB)技术制造的航空发动机钛合金空心整流叶片,实现了超塑成形工艺与扩散焊技术的结合,该叶片现已累计装机使用百余台。采用瞬间过渡液相扩散焊(TLP)技术配以镍基中间层合金 KNi9 实现了氧化物弥散强化高温合金 MGH956 材料的有效连接,高温抗拉强度达到基体的 80%,并在此基础上进行了 MGH956 材料的多孔层板结构新型冷却结构的制备。此外,还利用 TLP 扩散焊工艺技术进行了 Ni_3Al 合金涡轮导向叶片的制造,接头的持久强度达到基体的 80% 以上;发动机转子用扩散焊工艺焊接了 0.5mm 厚的铜板,使转子平面与分油盘间摩擦副能处于较好的工作状态;转子柱塞孔也用此工艺焊铜套,使柱塞与柱塞孔这对摩擦副也能处于较好的工作状态;柱塞座平面也采用了相同的工艺,保证了摩擦副柱塞座与垫板良好地工作。

当今,国外该项技术已广泛应用于 F119、F120、F414、GE90 等发动机中。美国 PW 公司从 20 世纪 70 年代开始针对单晶叶片的高性能连接需求,开发出焊接接头性能优异的 TLP 扩散焊技术。欧美、日本针对 TLP 扩散焊的连接机理、技术工艺特点及工程应用等开展深入研究,使 TLP 扩散焊技术达到工程应用水平,焊接的单晶对开叶片、双联(多联)导向叶片、多孔层板结构等高温新结构经过发动机的试车考核。国内扩散焊工艺及应用技术尚有许多问题待解决。

① 新材料及其构件的扩散焊。随着国内新型航空发动机工作温度的逐步提高,镍铝基金属间化合物、钛铝基金属间化合物和镍基单晶高温合金以及粉末合金、陶瓷和复合材料等难焊材料的连接逐渐增多。扩散焊以其焊接材料范围广且焊接接头强度和成分接近母材而作为首选焊接方法。另外,发动机整体叶盘、单晶对开叶片等新结构的扩散焊需求也越来越强烈。为了迎合当前航空发动机技术的高速发展,开展上述难焊材料和结构的扩散焊工艺与应用研究势在必行。

② TLP 用中间层合金的研制开发。国内开展扩散焊的研究时间不是很长,还不具有适用于各种材料 TLP 扩散连接的中间层合金体系,需要较长时间来进行中间层合金的研制开发和技术积淀。

③ 设备能力需要加强。目前,国内大部分扩散焊设备都来自美、德等国家,价格比较昂贵。这些设备基本分布在各大研究院所,且其容积规格仅限于小尺寸构件,对于科研生产型是远远不够的。绝大部分制造企业根本无设备能力,其原因之一是购置设备投资巨大。这种现状不符合现在扩散焊发展的趋势,改变这种现状的最好办法是能够实现扩散焊设备的国产化。

④ 可靠检验方法寻求及扩散焊质量验收标准的建立和完善。目前,扩散焊接头焊接质量检查方法采用随机抽查进行金相检查,并配以超声波等无损检测的手段。现在,尚无可靠的无损检测方法检查十分紧密接触的,且晶粒生长未穿过界面不良焊合区域的接头。生产和试验中用超高频($\geq 50\text{MHz}$)的超声扫描检测装置来检查,只对明显分离的未焊合和尺寸较大的孔洞才有效。因此,必须开展研究寻求可靠的检测方法。

1.3.3 钎焊及扩散焊技术的应用

(1) 在航空航天领域的应用

航空发动机是钎焊应用最广泛的领域之一。航空发动机推力大,燃油温度高,使用的结构材料多为不锈钢、钛合金和铝、钛含量较高的高温合金,特别是高温合金,它们的熔焊性能一般很差,因此,主要依靠真空扩散焊或气体保护钎焊进行连接。例如,发动机导流叶片、高压涡轮导向器叶片、转子叶片、整流器、扩压器、燃烧室燃油喷嘴、高压压气机冠环组件、燃烧室头部转环、发动机下舱、机舱加热器、高压涡轮轴承座等都是采用真空炉中钎焊或扩散焊方法制造的。燃油总管、动力轴、压力机静子环、液压和气压导管等大都采用气体保护感应加热钎焊。

钎焊及扩散焊技术在卫星制造中的应用也很多,包括波导微波器件、卫星姿控系统用来输送液体推进剂和高压气体的钛导管、卫星姿控发动机头部的毛细管等。其中波导微波器件是一种高精度、形状复杂、焊缝精细的部件,过去大多用铜合金或铝合金制造,采用火焰钎焊或盐浴钎焊制备。现在已有相当数量的铜波导被铝波导取代,并且越来越多的波导采用了真空钎焊代替火焰钎焊或盐浴钎焊。钎焊在空间站上主要用于管道系统的接头连接。例如,美国天空实验室的加工车间水管、冷却系统、姿控系统的导管接头均是采用感应钎焊连接的。

钎焊及扩散焊技术在航空航天领域的应用还有很多,例如美国 YF-12 飞机,它采用 Al-Ti 蜂窝芯复合板作机翼蒙皮,它是由 Al-Ti 上下面板、Ti-3Al-2.5V 蜂窝芯、TC4 框架和加强板四部分经真空钎焊组合而成。美国 GE 公司还采用扩散技术成功修复了 50 万件以上的高压涡轮部件,包括各种高、低压涡轮导向器裂纹及磨损等。

(2) 在电子工业中的应用

钎焊及扩散焊的发展史,特别是近几十年在电子工业中的广泛应用说明,钎焊、扩散焊技术及与之相应的合金的发展长期以来具有优势。其中软钎焊技术由于具有以下几方面的特点使其始终并继续居于主导地位。

首先,软钎焊具有应力匹配能力。软钎料在室温下通常是塑性优良的自退火合金,能吸收应力,没有加工硬化等问题。这种独特的性能使软钎焊技术能将不同膨胀系数、不同刚度水平和不同强度等级的材料连接在一起。

其次,软钎焊具有显著的经济性、高效性和可靠性。由于连接是在相对较低的温度下进行的,使得许多常规有机高分子材料和电子元件因受热而改变性能和破坏等问题得以有效避免;相对低成本的材料、简单的工具盒和可控的工艺使软钎焊具有特别明显的经济性和高效性;对一般民用产品,在自动化软钎焊操作中,已达到接头返修率低于 1% 的水平,而在北美航空部门,已有每小时钎焊 150 亿个焊点而无失败的报道。这些都充分说明了软钎焊方法高效和可靠的特点。

最后,软钎焊具有制造和修理的方便性。与其他冶金连接方法相比,软钎焊对操作工具要求相对简单和易于操作,并且由于软钎焊接头是可以拆卸的接头,或者说软钎焊过程是可逆的,因而使软钎焊修补简单方便。

软钎焊主要用于各种不同电子元器件的引线与印刷电路板焊盘的连接,制造不同类型的集成电路器件,如集成电路、芯片载体、多芯片组件和封装件等。硬钎焊广泛用于电真空器件、雷达的波导器件和天线的制造。真空扩散焊主要用于金属与陶瓷、金属与玻璃等的连接,如大功率发射器、同轴磁控管、连续波磁控管高频输出窗、高压真空电容器外壳、磁控管阳极座等都是采用真空扩散连接的典型产品。

(3) 在汽车工业中的应用

随着钎焊技术的发展,特别是气体保护钎焊炉和半连续真空钎焊炉的广泛应用,使采用

钎焊方法大批量、低成本地生产结构复杂的汽车部件成为可能,目前钎焊已成为汽车工艺不可缺少的连接技术。例如,用 Nocolor 钎焊炉已能大批量生产汽车的各种铝质蒸发器、冷凝器、中冷器、油冷器、水箱等。

液态氮分解连续钎焊炉已广泛用于汽车不锈钢部件的钎焊,例如,燃油分配器、机油冷却器、散热器等。高纯氮与少量氢的气体保护钎焊也已大量用于碳钢部件的钎焊,例如变速器齿轮、电泵泵架等。真空钎焊和扩散焊主要用于汽车热交换器管路连接,如 U 形弯头、汇集总管、接管与接头体、异径三通、接管与膨胀阀等部位的连接,客车门、铝合金窗框也开始采用火焰钎焊制造。

(4) 在家电工业中的应用

钎焊及扩散焊技术对家电工业的发展有着至关重要的作用。电冰箱的压缩机、空调的蒸发器和冷凝器、燃气热水器都离不开钎焊或扩散焊技术。例如冰箱压缩机壳体上的排气管、工艺管和吸气管,其材质为铜管,而壳体材料为低碳钢。管与壳体的接头形式为插接,所焊钎缝外观要求光滑,无裂纹、缩孔和未焊透,目前大多采用多工位转盘式自动火焰钎焊。

电脑、彩电、手机和音响等家电设备的印刷电路板有上万个焊点,印刷电路板与电子元器件的焊接通常采用自动化程度很高的软钎焊,如波峰焊、再流焊,在焊点很少的情况下可采用电烙铁焊接。印刷电路板与电子元器件焊点质量往往会直接影响这些家电产品的质量,严重的会影响到它们的使用性能。

此外,钎焊及扩散焊技术在家电工业中的应用还有很多,如空调和冰箱压缩机储液、分液器壳体与铜管的自动火焰钎焊,空调消声器的真空钎焊,空分机用铝板翅式换热器的真空扩散焊等。

(5) 在石油和煤炭工业中的应用

钎焊及扩散焊技术在石油工业中的应用主要是钎焊各种硬质合金钻头和聚晶金刚石钻头。例如硬质合金刮刀式钻头、聚晶金刚石取芯钻头、聚晶金刚石扩孔钻头、聚晶金刚石与硬质合金复合体钻头以及聚晶金刚石复合片切削齿钻头等。

钎焊技术在煤炭工业中的主要应用是钎焊采煤工具用的钎头和截煤齿。钎头通常由硬质合金钎刃和钎头体两部分组成,钎刃材料为具有高韧性的硬质合金,如 YG15、YG11C、YG8 等。钎头体则用 45 钢、40Cr 和 18CrMnNiMoA 等高强度钢制造。焊后对接头要求有较高的钎缝强度及抗疲劳冲击韧性,钎焊过程中应避免硬质合金产生裂纹,并且要求具有较高的生产效率。

对于中小型钎头,大多采用高频钎焊;对于大型钎头,则较多采用盐浴浸渍钎焊。采煤机上的截煤齿是机械化采煤作业的主要工具,年消耗量很大。我国生产的采煤机截煤齿有很多形状、尺寸的系列规格。通常截煤齿由齿体和硬质合金刀头两部分组成,一般采用感应钎焊和电阻钎焊两种方法。

(6) 在其他行业中的应用

钎焊及扩散焊技术在电机的制造中有着十分重要的作用,特别是大型电机,几乎离不开钎焊或扩散焊。例如 12.5 万千瓦和 30 万千瓦双水内冷发电机转子线圈空心铜线与不锈钢引水管的连接;大型发电机转子线圈接头采用了电阻钎焊;600MW 汽轮发电机定子引线水管接头采用中频感应钎焊;水冷发电机磁极线圈铜排使用火焰钎焊连接;超导电动机转子绕组中多股铌钛超导复合扁线的软钎焊连接;全氢冷却 30 万千瓦汽轮发电机静导叶片环采用真空扩散焊等。

此外,钎焊及扩散焊技术在电器及仪表上的应用也很多,如高、低压电器开关、接触器触头、超低温集成稳压器和变压器铜导线等元器件的焊接等。

第 2 章 钎料与钎剂

钎料是钎焊时的填充材料,钎焊件依靠熔化的钎料连接起来,钎料自身的性能及其与母材间的相互作用在很大程度上决定了钎焊接头的性能;钎剂是钎焊过程中用的熔剂,与钎料配合使用,其作用是清除熔融钎料和母材表面的氧化物,保护钎料及母材表面不被继续氧化。钎料与钎剂的合理选用对钎焊接头的质量起关键作用。

2.1 钎料的类型及特点

2.1.1 对钎料的基本要求

钎焊技术是依靠液态钎料的润湿作用填充接头间隙,与母材相互扩散而实现工件的连接。因此,对钎料的基本要求如下。

① 具有适当的熔点,钎料的熔点至少应比母材的熔点低几十度,两者熔点过分接近使钎焊过程不易控制,甚至导致母材晶粒过烧或局部熔化。

② 具有良好的润湿性,应能在母材表面充分铺展并填满钎缝间隙。为保证钎料良好润湿和填缝,在钎料流入接头间隙之前就应处于完全熔化状态。应将钎料的液相线看作钎焊时可采用的最低温度,接头的整个截面必须加热到液相线温度或更高的温度。

③ 能与母材发生溶解、反应扩散等相互作用,并形成牢固的冶金结合。钎料与母材界面适当的相互作用可以使钎料发生合金化反应,提高钎焊接头的力学性能。

④ 应具有稳定和均匀的成分,在钎焊过程中应尽量避免出现偏析现象和易挥发元素的烧损。

⑤ 得到的钎焊接头应能满足使用要求,如力学性能和物理化学性能等方面的要求。还应考虑钎料的经济性,在满足工艺性能和使用性能的前提下,尽量少用或不用稀有金属和贵金属,降低生产成本。

2.1.2 钎料的类型及化学成分

钎料通常按其熔化温度范围分类,熔化温度低于 450°C 的称为软钎料,高于 450°C 的称为硬钎料,高于 950°C 的称为高温钎料。有时根据熔化温度和钎焊接头的强度不同,将钎料分为易熔钎料(软钎料)和难熔钎料(硬钎料)。根据组成钎料的主要元素,软钎料分为铋基、铜基、锡基、铅基、镉基、锌基等;硬钎料分为铝基、银基、铜基、锰基、金基、镍基等。各类钎料的熔化温度范围如表 2.1 所示。

表 2.1 各类钎料的熔化温度范围

软 钎 料		硬 钎 料	
组 成	熔点范围/ $^{\circ}\text{C}$	组 成	熔点范围/ $^{\circ}\text{C}$
Zn-Al 钎料	380~500	镍基钎料	780~1200
Cd-Zn 钎料	260~350	钎钎料	800~1230
Pb-Ag 钎料	300~500	金基钎料	900~1020
Sn-Zn 钎料	190~380	铜钎料	1080~1130
Sn-Ag 钎料	210~250	黄铜钎料	820~1050
Sn-Pb 钎料	180~280	铜磷钎料	700~900
Bi 基钎料	40~180	银基钎料	600~970
In 基钎料	30~140	铝基钎料	460~630

(1) 铝基钎料

铝基钎料适用于火焰钎焊、炉中钎焊、盐浴钎焊和真空钎焊等工艺方法。铝基钎料的分类、型号、形状及熔化温度范围见表 2.2。

表 2.2 铝基钎料的分类、型号、形状及熔化温度范围

分 类	钎料型号	固相线温度/℃	液相线温度/℃	形 状
铝硅	BA188Si	577	580	丝、带、条、粉
	BA190Si	577	590	丝、带
	BA192Si	577	615	丝、带
铝硅铜	BA167CuSi	525	535	条
	BA186SiCu	520	585	丝、带、条
铝硅镁	BA186SiMg	559	579	丝、带
	BA188SiMg	559	591	丝、带
	BA189SiMg	559	582	丝、带
	BA190SiMg	559	607	丝、带

铝基钎料的化学成分应符合表 2.3 的规定。丝状、带状、条状钎料表面应光洁，不应有影响钎焊性能的油污、夹杂物、起皮、分层和裂纹等缺陷。每批钎料应在不同部位取三个代表性试样进行化学分析，在分析中如发现有其他元素时须作进一步分析。如分析结果不符合表 2.3 规定，应加倍取样对该项目进行复验。

表 2.3 铝基钎料的化学成分

%

型 号	Al	Si	Cu	Zn	Fe	Mg	Cr	Ti	Mn	其他	
BA188Si	余量	11.0~13.0	<0.30	<0.20	<0.8	<0.10	—	—	<0.05	<0.15	
BA190Si		9.0~11.0	<0.25	<0.10		<0.15		0.20	<0.05		
BA192Si		6.8~8.2	2.7~2.9	<0.20		—	<0.15	—	<0.10		
BA167CuSi		5.5~6.5	3.3~4.7						<0.15		
BA186SiCu		9.3~10.7	—						<0.15		
BA186SiMg		11.0~13.0	—			0.20~1.0	—	—	<0.10		
BA188SiMg		9.0~10.5	—								
BA189SiMg		9.5~11.0	—								
BA190SiMg		6.8~8.2	—			2.0~3.0					

(2) 银基钎料

银基钎料适用于气体火焰钎焊、电阻钎焊、炉中钎焊、感应钎焊和浸渍钎焊等工艺方法，用途较广泛。根据 GB10046《银基钎料》标准规定，银基钎料的分类、型号及熔化温度见表 2.4。

银基钎料的化学成分应符合表 2.5 的规定。钎料表面应光洁，不应有影响钎焊性能的油污、夹杂物、起皮、针孔、分层和裂纹等缺陷。钎料应具有良好的钎焊工艺性能。每批钎料应在不同部位取三个代表性试样进行化学分析，在常规分析中如发现有其他杂质时须作进一步分析，杂质元素的总量不得超过 0.15%。

表 2.4 银基钎料的分类、型号及熔化温度范围

分 类	钎料型号	固相线温度/℃	液相线温度/℃	钎焊温度/℃
银铜	BAg72Cu	779	779	770~900
银铝	BAg94Al	780	825	825~925
银铜锂	BAG72CuLi	766	766	766~871
	BAG72CuNiLi	780	800	800~850
银铜锌	BAG10CuZn	815	850	850~950
	BAG25CuZn	700	800	800~890
	BAG45CuZn	665	745	745~845
	BAG50CuZn	690	775	775~870
银铜锡	BAG60CuSn	600	720	720~840
银铜锌镉	BAG35CuZnCd	605	700	700~845
	BAG45CuZnCd	—	620	620~760
	BAG50CuZnCd	625	635	635~760
	BAG40CuZnCdNi	595	605	605~705
	BAG50CuZnCdNi	630	690	690~815
银铜锌锡	BAG34CuZnSn	—	730	730~820
	BAG56CuZnSn	620	650	650~760
	BAG40CuZnSnNi	634	640	640~740
	BAG50CuZnSnNi	650	670	670~770
银铜锌锰	BAG20CuZnMn	740	690	790~845
	BAG49CuZnMnNi	625	705	705~850

表 2.5 银基钎料的化学成分

型 号	Ag	Cu	Zn	Cd	Ni	Sn	Li	Al	Mn
BAG72Cu	71.0~73.0	余量	—	—	—	—	—	—	—
BAG94Al	余量	—	—	—	—	—	—	4.5~5.5	0.7~1.3
BAG72CuLi	71.0~73.0	余量	—	—	—	—	0.3~0.5	—	—
BAG72CuNiLi	71.0~73.0	余量	—	—	0.8~1.2	—	0.4~0.6	—	—
BAG10CuZn	9.0~11.0	52.0~54.0	36.0~32.0	—	—	—	—	—	—
BAG25CuZn	24.0~26.0	40.0~42.0	33.0~35.0	—	—	—	—	—	—
BAG45CuZn	44.0~46.0	29.0~31.0	23.0~27.0	—	—	—	—	—	—
BAG50CuZn	49.0~51.0	33.0~35.0	14.0~18.0	—	—	—	—	—	—
BAG60CuSn	59.0~61.0	余量	—	—	—	9.5~10.5	—	—	—
BAG35CuZnCd	34.0~36.0	25.0~29.0	19.0~23.0	17.0~19.0	—	—	—	—	—
BAG45CuZnCd	44.0~46.0	14.0~16.0	14.0~18.0	23.0~25.0	—	—	—	—	—
BAG50CuZnCd	49.0~51.0	14.5~16.5	14.5~18.5	17.0~19.0	—	—	—	—	—
BAG40CuZnCdNi	39.0~41.0	15.5~16.5	17.3~18.5	25.1~26.5	0.1~0.3	—	—	—	—
BAG50CuZnCdNi	49.0~51.0	14.5~16.5	13.5~17.5	15.0~17.0	2.5~3.5	—	—	—	—
BAG34CuZnSn	33.0~35.0	35.0~37.0	25.0~29.0	—	—	2.5~3.5	—	—	—
BAG56CuZnSn	55.0~57.0	21.0~23.0	15.0~19.0	—	—	4.5~5.5	—	—	—
BAG40CuZnSnNi	39.0~41.0	24.0~26.0	29.5~31.5	—	1.30~1.65	2.7~3.3	—	—	—
BAG50CuZnSnNi	49.0~51.0	20.5~22.5	26.0~28.0	—	0.30~0.65	0.7~1.3	—	—	—
BAG20CuZnMn	19.0~21.0	39.0~41.0	33.0~37.0	—	—	—	—	—	4.5~5.5
BAG49CuZnMnNi	48.0~50.0	15.0~17.0	余量	—	4.0~5.0	—	—	—	6.5~8.5

(3) 铜基钎料

铜基钎料适用于气体火焰钎焊、电阻钎焊、炉中钎焊、感应钎焊和浸渍钎焊等工艺方法，用途较广泛。铜基钎料分为纯铜钎料、铜锌钎料和铜磷钎料，其型号见表2.6。

表2.6 铜基钎料的分类和型号

分 类	钎料标准型号	样本牌号
铜钎料	BCu	—
铜锌钎料	BCu54Zn	料 103 或 HL103
	BCu58ZnMn	料 105 或 HL105
	BCu60ZnSn-R	丝 221
	BCu58ZnFe-R	丝 222
	BCu48ZnNi-R	—
	BCu57ZnMnCo	—
	BCu62ZnNiMnSi-R	—
铜磷钎料	BCu93P	料 201 或 HL201
	BCu92PSb	料 203 或 HL203
	BCu86SnP	—
	BCu91PAg	—
	BCu89PAg	—
	BCu80PAg	料 204 或 HL204
	BCu80SnPAg	—

铜基钎料的化学成分应符合表2.7和表2.8的规定。丝状、带状、条状钎料表面应光洁，不应有影响钎焊性能的油污、夹杂物、起皮、分层和裂纹等缺陷。每批钎料应在不同部位取三个代表性试样进行化学分析，在分析中如发现有其他元素时须作进一步分析，以确定杂质总量是否超过规定的要求。铜基钎料的熔化温度范围见表2.9。

表2.7 铜和铜锌钎料的化学成分

型 号	化学成分/%										
	Cu	Zn	P	Sn	Si	Fe	Mn	Ni	Al	Pb	Co
BCu	99.9	—	0.075	—	—	—	—	—	0.01*	0.02	—
BCu54Zn	53.0~55.0	余量	—	—	—	—	—	—	—	0.015*	—
BCu58ZnMn	57.0~59.0		—	—	—	0.15	3.7~4.3	—	—	0.015*	—
BCu60ZnSn-R	59.0~61.0		—	0.8~1.2	0.15~0.35	—	—	—	—	0.10*	—
BCu58ZnFe-R	57.0~59.0		—	0.7~1.0	0.05~0.15	0.35~1.20	0.03~0.09	—	0.10*	0.20*	—
BCu48ZnNi-R	46.0~50.0		0.25	—	0.04~0.25	—	—	9.0~11.0	0.10*	0.05*	—
BCu57ZnMnCo	56.0~58.0		—	—	—	—	1.5~2.5	—	—	—	1.5~2.5
BCu62ZnNiMnSi-R	61.0~63.0		—	0.1	0.1~0.3	—	0.1~0.3	0.3~0.5	—	—	—

注：1. 表中单值数表示最大值。

2. 杂质总量：BCu≤0.10%，铜锌钎料≤0.50%，杂质总量包括有*元素的含量。

表 2.8 铜磷钎料的化学成分

型号	化学成分/%							杂质总量
	Cu	Sb	P	Ag	Sn	Si	Ni	
BCu93P	余量	—	6.8~7.5	—	—	—	—	≤0.15
BCu92PSb		1.5~2.5	5.8~6.7	—	—		—	
BCu86SnP		—	4.8~5.8	—	7.0~8.0		0.4~1.2	
BCu91PAg		—	6.8~7.2	1.8~2.2	—		—	
BCu89PAg		—	5.8~6.7	4.8~5.2	—		—	
BCu80PAg		—	4.8~5.3	14.5~15.5	—		—	
BCu80SnPAg		—	4.8~5.8	4.5~5.5	9.5~10.5		—	

表 2.9 铜基钎料的熔化温度范围

型 号	固相线温度/℃	液相线温度/℃
BCu	—	1083
BCu54Zn	885	888
BCu58ZnMn	880	909
BCu60ZnSn-R	890	905
BCu58ZnFe-R	865	890
BCu48ZnNi-R	921	935
BCu57ZnMnCo	890	930
BCu62ZnNiMnSi-R	853	870
BCu93P	710	800
BCu92PSb	690	800
BCu86SnP	620	670
BCu91PAg	645	790
BCu89PAg	645	815
BCu80AgP	645	800
BCu80SnPAg	560	650

(4) 锰基钎料

锰基钎料适用于气体保护的炉中钎焊、感应钎焊和真空钎焊等工艺方法。根据 GB/T13679《锰基钎料》标准规定，锰基钎料的分类、型号、熔化温度和钎焊温度见表 2.10。

表 2.10 锰基钎料的分类、型号、熔化温度和钎焊温度

分 类	钎料型号	熔化温度/℃	钎焊温度/℃
锰铜铬	BMn70NiCr	1035~1080	1140~1180
	BMn40NiCrCoFe	1065~1135	1160~1200
锰镍钴	BMn68NiCo	1050~1070	1120
	BMn65NiCoFeB	1010~1035	1040~1100
锰镍铜	BMn52NiCuCr	1000~1010	1060
	BMn50NiCuCrCo	1010~1035	1080
	BMn45NiCu	920~950	1000

锰基钎料的化学成分应符合表 2.11 规定。带状及丝状钎料表面应光洁,不应有影响钎焊性能的油污、氧化膜、夹杂物、分层和裂纹等缺陷。每批钎料不超过 200kg,应在不同部位随机抽取三个试样进行化学分析,在分析中如发现其他杂质元素时须作进一步分析。如分析结果不符合表 2.11 规定,应加倍取样对该项目进行复验。

表 2.11 锰基钎料的化学成分

%

型 号	Mn	Ni	Cu	Cr	Co	Fe	B	C	S	P	其他
BMn70NiCr	余量	24.0~ 26.0	—	4.5~ 5.5	—	—	—	≤0.10	≤0.20	≤0.20	≤0.30
BMn40NiCrCoFe		40.0~ 42.0	—	11.0~ 13.0	2.5~ 3.5	3.5~ 4.5	—				
BMn68NiCo		21.0~ 23.0	—	—	9.0~ 11.0	—	—				
BMn65NiCoFeB		15.0~ 17.0	—	—	15.0~ 17.0	2.5~ 3.5	0.02~ 0.01				
BMn52NiCuCr		27.5~ 29.5	13.5~ 15.5	4.5~ 5.5	—	—	—				
BMn50NiCuCrCo		26.5~ 28.5	12.5~ 14.5	4.0~ 5.0	4.0~ 5.0	—	—				
BMn45NiCu		19.0~ 21.0	34.0~ 36.0	—	—	—	—				

(5) 镍基钎料

镍基钎料适用于炉中钎焊、感应钎焊和电阻钎焊等工艺方法。根据 GB10859《镍基钎料》标准规定,镍基钎料的分类、型号和钎焊温度见表 2.12。

表 2.12 镍基钎料的分类、型号和钎焊温度

类 别	钎料型号	固相线温度/℃	液相线温度/℃	钎焊温度/℃
镍钴硅硼	BNi74CrSiB	975	1040	1065~1205
	BNi75CrSiB	975	1075	1075~1205
	BNi82CrSiB	970	1000	1010~1175
镍钴钨硼	BNi68CrWB	970	1095	1150~1250
镍硅硼	BNi92SiB	980	1040	1010~1175
	BNi93SiB	980	1065	1010~1175
镍铬硅	BNi71CrSi	1080	1135	1150~1250
镍磷	BNi89P	875	875	925~1025
镍铬磷	BNi76CrP	890	890	925~1040
镍锰硅铜	BNi56MnSiCu	980	1010	1010~1095

镍基钎料的化学成分应符合表 2.13 规定。钎料可以棒状、箔带状、粉状等形式供货,棒状钎料应表面光洁,没有影响钎焊性能的夹杂物及氧化皮等缺陷。粉状钎料外观应呈金属光泽,不得有其他夹杂物和油污。钎料应具有好的钎焊工艺性能,在合适的钎焊工艺条件下,钎缝表面不应有未熔化的残留物。

表 2.13 镍基钎料的化学成分

%

型 号	Ni	Cr	B	Si	Fe	C	P	W	Mn	Cu	其他							
BNi74CrSiB	余量	13.0～ 15.0	2.75～ 3.50	4.0～ 5.0	4.0～ 5.0	0.60～ 0.90	0.02	—	—	—	0.50							
BNi75CrSiB		6.0～ 8.0			2.5～ 3.5	0.06												
BNi82CrSiB																		
BNi68CrWB		9.5～ 10.5	2.20～ 2.80	3.0～ 4.0	2.0～ 3.0	0.30～ 0.60		11.5～ 12.5										
BNi92SiB		—	2.75～ 3.50	4.0～ 5.0	0.5	0.06		—										
BNi93SiB		—	1.50～ 2.20	3.0～ 4.0	1.5													
BNi71CrSi		18.5～ 19.5	0.03	9.75～ 10.50	—	0.10												
BNi89P		—	—	—	0.20	0.10	10.0～ 12.0											
BNi76CrP		13.0～ 15.0	0.01	0.10	—	0.08	9.7～ 10.5	0.04										
BNi66MnSiCu		—	—	6.0～ 8.0	—	0.10	0.02	21.0～ 24.5				4～5						

注：除规定外，单个值表示最大值质量分数；如果测定钻，最大值为 1.0%。

(6) 膏状钎料

膏状钎料是由钎料合金粉末、钎剂及黏结剂所构成的膏体，优点在于容易实现钎料用量的控制，便于复杂结构的装配和易于实现钎焊过程的自动化。在实际生产过程中，经常会遇到需要将粉末状钎料与钎剂混合并用溶剂调成糊状来使用，这也可称为膏状钎料。近年来，随着微电子组装技术的发展和推广应用，对膏状钎料的需求量越来越大。

膏状钎料（也称钎料膏）通常由钎料粉和钎料载体（软钎剂、溶剂、活化剂和调节流变特性的介质等）组成。钎料粉是钎缝金属的主要来源，钎料粉的形状以球形为主，粉末的颗粒度要均匀一致。颗粒度一般取 $149\mu\text{m}$ （100 目）、 $74\mu\text{m}$ （200 目）、 $63\mu\text{m}$ （250 目）、 $46\mu\text{m}$ （300 目）和 $45\mu\text{m}$ （325 目）等几级，以适应不同的涂覆方式。钎料膏中钎料粉的质量分数通常为 75%~90%，为了获得钎焊后较高的金属沉积量，常取质量分数为 85%~90%。

钎料载体在室温下应是液体或凝胶体，在 85°C 以下迅速干燥，并在钎焊温度下维持其活性。载体主要由松香或树脂、溶剂、活化剂和流变改性剂组成。松香是钎剂的主体，常用水白松香。活化剂可以是有机胺、有机酸或氨基酸盐酸盐等，根据其活性程度可分为“R”级（无活性）、“RMA”级（中度活性）、“RA”级（完全活性）和“OA”级（较高活性）等几个级别。“RA”和“OA”级因具有较高的腐蚀性，很少用于微电子领域。溶剂主要用于调节液体的流动性和黏度，为保证钎料膏长期使用，溶剂可选用单种或多种有机物系统。

根据钎料合金粉末的成分，可将钎料膏划分为许多种，如：

① 锡铅系钎料膏 应用最广泛，尤其以 60Sn/40Pb 和 63Sn/37Pb 的应用最多。5Sn/95Pb 及 10Sn/90Pb 用于较高温度的钎焊，因为其富含铅而比较便宜。

② 锡铅银系钎料膏 主要用于镀银材料的钎焊，钎料中添加银是为了减小厚膜中银的溶解。常用的有 62Sn/36Pb/2Ag 和 5Sn/93.5Pb/1.5Ag。

③ 锡银系钎料膏 典型的为 95Sn/5Ag 和 96.5Sn/3.5Ag，其优点在于接头强度高，抗热疲劳性能好。

调制膏状钎料时,用陶瓷器皿盛装适量钎料粉,缓缓倒入黏结剂,便倒边搅拌,直到稀稠程度合适为止。如果太稀,不易控制注射量,且易漫流散失;加之黏结剂含量高,加热后大量挥发,会引起钎料剧烈飞溅,出现因钎料不足引起的缺陷。如果太稠,不易注射,附着性差,干燥后容易脱落。稀稠程度的辨别可用搅拌的玻璃棒将钎料膏沾起来,如果下垂连续长度为15~20mm即可。

可采用尼龙注射器注射钎料膏,注射量根据接头尺寸和间隙而定。推荐注射的膏状钎料体积应为接头装配间隙最大容积的4倍。注射好的钎料膏,根据所用黏结剂种类,分别在室温下干燥或干燥箱中干燥。对于一次未用完或黏附于容器、注射器、搅拌棒等处的膏状钎料,要进行回收,溶解于丙酮中,反复过滤,直到黏结剂被全部清除,然后烘干收藏,下次再用。

为了限制液态钎料的随意流动,防止组件间相互熔结在一起以及组件与钎焊夹具之间的钎接,有时需要使用阻钎剂。阻钎剂是一种能够阻止液态钎料流动的有机溶剂,基本成分是一些对钎焊无害的非常稳定的氧化物,如氧化铝、氧化钛、氧化镁和某些稀土氧化物,或与钎料不能润湿的非金属物质(如石墨、白垩等)。用适当的黏结剂调成糊状或液体,钎焊前预先涂在接头附近,在钎焊温度下,附着在工件表面的残留物阻止钎料的溢流,钎焊后再将残留物去除。

表2.14列出几种常用阻钎剂的成分和使用范围。这几种阻钎剂在钎焊过程中,热稳定性好,涂覆性能也好,化学稳定性优良,对工件无腐蚀作用。

表 2.14 常用阻钎剂的成分和使用范围

序号	溶剂	阻钎剂组分		使用范围/℃
		黏结剂	填充物	
1	甲苯	有机硅树脂	TiO ₂ 、SiO ₂	600~1200
2	酒精	水玻璃	Al ₂ O ₃	300~1100
3	酒精	醇溶性树脂	陶土、膨润土	300~1000
4	水	—	Cr ₂ O ₃ 、石墨	800~1200

(7) 非晶态钎料

非晶态钎料是近年来发展起来的一种新型钎料。所谓“非晶态”是相对于晶态而言的,其特征是保留了液态金属的原子无序排列的结构和各向异性,但原子之间仍以金属键结合。获取非晶态金属的最常用的方法是快速急冷技术,对于硬而脆、无法用压延方式成形的金属或合金,可将其加热熔化,然后浇到高速旋转的铜质水冷飞轮上,使其以极高的速度冷却,即可得到非晶态合金箔。

国内已经进入标准的非晶态钎料有7K301(镍基钎料)、7K701(Cu-Si-Ni系钎料)、7K702(Cu-Ni-Sn-P)和7K703(Cu-Ag-Sn-P)四个系列,其他一些非晶态钎料也时有报道。国外已经开发出铜基、铜磷基、钨基、锡基、铅基、铝基、钛基、钴基等九大系列几百种牌号的非晶态钎料。

国内研制的镍基和铜基非晶态钎料的化学成分和熔化温度见表2.15和表2.16。

非晶态钎料具有以下几方面的特点。

① 化学成分均匀,杂质含量少,纯度高,钎料各组分不分离,能显著改善钎焊接头的强度。

② 不含黏结剂,加热速率不受限制,钎缝无非金属夹渣,钎焊接头质量高。

③ 钎料可按工件结构需要冲剪成各种精确的形状,从而能严格控制钎料的用量和抑制液态钎料的溢流。

表 2.15 非晶态镍基钎料的化学成分和熔化温度

钎料编号	化学成分/%							固相线温度 /℃	液相线温度 /℃	
	Ni	C	B	Cr	Fe	Si	Co			其他
QGNi-1001	余	0.03	2.0~ 3.5	—	—	4.2~ 4.6	—	—	980	1050
QGNi-1002	余	0.02	2.3~ 2.6	—	—	5.4~ 7.6	—	—	980	1010
QGNi-1003	余	0.02	1.3~ 1.7	18~ 19.5	—	6.0~ 8.0	—	—	1020	1075
QGNi-1004	余	0.02	2.4~ 3.0	—	—	3.8~ 4.5	18.5~ 20.0	—	970	1087
QGNi-1005	余	0.01	3.3~ 4.2	14.5~ 16	—	—	—	—	1025	1080
QGNi-1006	余	0.04	2.7~ 3.5	13.0~ 15.0	4.0~ 5.0	4.0~ 5.0	—	—	1010	1100
QGNi-1007	余	0.04	2.5~ 3.2	12.0~ 14.0	3.5~ 5.0	0~5	< 1.0	—	1005	1100
QGNi-1008	余	0.02	2.7~ 3.5	6.5~ 7.5	2.5~ 3.0	3.0~ 5.0	—	—	972	1000
QGNi-1009	余	0.02	3.5~ 4.0	9.7~ 10.7	5.3~ 5.7	—	22.5~ 23.5	Mo 6.7~7.3	1015	1075
QGNi-1010	余	0.02	2.0~ 2.5	11.0~ 12.2	3.9~ 4.9	1.2~ 1.7	—	W 7.5~8.5	1060	1110
QGNi-1011	余	0.02	1.5~ 2.0	4.5~ 5.5	2.0~ 2.5	5.6~ 6.0	~3.0	Cu 5.0~6.0 Mn 4.5~5.5	948	976
QGNi-1012	余	0.02	1.5~ 2.0	—	—	5.0~ 6.0	—	Cu 5.0~6.0 Mn 19~21	980	960

表 2.16 非晶态铜基钎料的化学成分和熔化温度

钎料编号	化学成分/%					固相线温度 /℃	液相线温度 /℃
	Cu	Ni	Sn	P	In		
QGCu-200B	余	—	19~21	—	—	730	925
QGCu-200C	余	1.5~2.5	19~21	—	1.5~2.5	775	880
QGC-2001	余	9.0~10.0	9.5~10.5	6.5~7.1	—	585	660
QGC-2002	余	9.0~10.0	4.0~5.0	7.2~7.8	—	601	630
QGC-2003	余	13.0~15.0	9.0~10.0	6.5~7.1	—	533	640
QGC-2005	余	4.8~5.8	9.0~10.0	6.5~7.0	—	553	630

④ 由于非晶态钎料箔通常是预置在钎焊间隙内的, 因此对其填充间隙的能力要求不高, 为较大面积平面接头的钎焊提供了较高的可靠性。

⑤ 与含黏结剂的钎料相比, 不受存储时间和存储条件的限制。

2.2 钎料的选择及特性

2.2.1 钎料的选择原则

钎料的种类繁多, 使用过程中的影响因素也很多。从原则上来说, 选用钎料应从以下几个方面来考虑。

① 钎料与母材的匹配 对于确定的母材,所选用的钎料应具有适当的熔点,对母材有良好的润湿性和填缝能力。与母材相互作用能产生有益的结果,能避免形成脆性的金属间化合物。尽量选择钎料的主要成分与母材主要成分相同;钎料的液相线要低于母材固相线40~50℃;钎料的熔化区间要尽可能小,温差过大时,容易引起熔析。

② 钎料与钎焊方法的匹配 不同的钎焊方法对钎料性能的要求不同,如采用火焰钎焊时,钎料的熔点应与母材的熔点相差尽可能大,避免可能产生的母材局部过热、过烧或熔化等;采用电阻钎焊方法时,希望钎料的电阻率比母材的电阻率大一些,以提高加热效率;炉中钎焊时,钎料中易挥发元素的含量应较少,保证在相对较长的钎焊时间内不会因为合金元素的挥发而影响到钎料的性能。

③ 保证满足使用要求 不同产品在不同的工作环境和条件下对钎焊接头性能的要求不同,这些要求可能涉及导电性、导热性、工作温度、力学性能、密封性、抗氧化性、耐腐蚀性等,选择钎料时应着重考虑其最主要的使用要求。钎焊接头最常见的使用要求是强度、抗氧化性和耐腐蚀性,有疑问时可取些试样通过实验来确定接头是否满足必要的工作时间、温度和强度的要求。

④ 钎焊结构要求 钎焊结构的复杂性有时需要将钎料预先加工成形,如制成环状、垫圈、垫片状、箔材和粉末等形式,预先放置在钎焊间隙中或其附近。因此,在选用钎料时要充分考虑其加工性能是否可以制成所需要的形式。

⑤ 生产成本 包括钎料的成本、成形加工成本和钎焊方法及设备投资等方面的成本。生产批量不大时,优先考虑产品的性能和质量;大批量生产中钎料成本的降低具有重要的经济意义。

正确地选用钎料是保证获得优质钎焊接头的关键,应从钎料和母材的相互匹配、钎焊件的使用工况要求、现有设备条件以及经济性等方面进行综合考虑来确定。表2.17列出了根据生产实践总结出的钎料与母材的匹配优先选用的顺序。

表 2.17 钎料与母材的匹配优先选用的顺序

母 材	铝基钎料	铜基钎料	银基钎料	镍基钎料	钴基钎料	金基钎料	钨基钎料	钼基钎料	钛基钎料
铜及铜合金	3	1	2	6	—	4	—	5	7
铝及铝合金	1	—	—	—	—	—	—	—	—
钛及钛合金	2	4	3	—	—	5	6	7	1
碳钢及合金钢	—	1	2	6	8	4	5	3	7
马氏体不锈钢	—	6	7	1	5	2	4	3	—
奥氏体不锈钢	—	3	7	1	6	5	4	2	—
沉淀硬化高温合金	—	2	8	1	3	4	5	6	7
非沉淀硬化高温合金	—	6	7	4	5	1	2	3	8
硬质合金及碳化钨	—	1	5	6	7	4	3	2	8
精密合金及磁性材料	—	2	1	6	7	3	5	4	8
陶瓷、石墨及氧化物	—	3	2	7	8	4	6	5	1
难熔金属	—	7	8	6	5	4	2	3	1
金刚石、宝石	—	8	6	4	5	1	2	7	3
金属基复合材料	1	4	3	8	9	5	6	7	2

注:表中1~9表示由先到后的匹配及选用顺序。

从工况考虑,主要是依据焊件的工作温度和载荷大小,一般原则如下。

① 300℃以下低载荷接头，优先选用铜基钎料。对于长接头要求改善间隙填充性能时，可选用在铜中加入少量硼的 Cu-Ni-B 钎料。

② 在 300~400℃之间工作的低载荷接头，选用铜基钎料和银基钎料；其中铜基钎料比较便宜，应优先选用。

③ 在 400~600℃之间工作的抗氧化、耐腐蚀、高应力的接头，选用锰基、钼基、金基或镍基钎料。在重要部件上最好选用 Au-22Ni-6Cr 或 Au-18Ni 钎料，钎焊工艺性能好，钎焊温度适中（980~1050℃），获得的接头综合力学性能佳。

④ 在 600~800℃之间工作的接头，选用钼基、镍基、钴基钎料。优先使用流动性好的 Ni-Cr-B-Si 系钎料。但因这种钎料含硼量较高，不适用于厚度小于 0.5mm 的零件。

⑤ 在 800℃以上工作的接头，可选用镍基钎料和钴基钎料；但其中含磷的镍基钎料和 Ni-Cr-B-Si 系钎料不宜选用，因其强度和抗氧化性能难以满足要求。

另外，从接头的特定使用要求出发，可作如下选择。

① 耐腐蚀、抗氧化接头，通常选用金基、银基、钴基、钼基、镍基或钛基钎料。

② 从强度考虑，一般由高到低的顺序是：钴基、镍基、钼基、钛基、金基、锰基、铜基、银基、铝基。

③ 从电性能方面考虑，通常选用金基、银基、铜基、铝基钎料。在均能满足要求的前提下，优先选用价格便宜的铜基钎料。

④ 对于特殊要求的焊件，要根据具体要求选用钎料。例如在核工业中使用的钎料不允许含硼，因为硼对中子有吸收作用。

2.2.2 常用钎料的特性及用途

锡铅钎料的特性及用途列于表 2.18；铝基钎料的特性及用途列于表 2.19；铜和铜锌钎料的特性及用途列于表 2.20；铜磷钎料的特性及用途列于表 2.21。

表 2.18 锡铅钎料的特性及用途

钎料牌号	化学成分/%			熔化温度/℃	抗拉强度/MPa	伸长率/%	电阻率/ $\Omega \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$	用 途
	Sn	Sb	Pb					
HL600 (HLSnPb39)	59~61	≤0.8	余量	183~185	46	34	0.145	是共晶型钎料，熔点最低，流动性好，用于无线电零件、计算机零件及易熔金属铸件、热处理（淬火）件的钎焊
HL601 (HLSnPb80-2)	17~18	2.0~2.5	余量	183~277	27	67	0.22	熔点较高，适宜于钎焊低温工作的工件
HL602 (HLSnPb68-2)	29~31	1.5~2.0	余量	183~256	32	—	0.182	用作钎焊电缆护套、铅管摩擦钎焊等，应用较广
HL603 (HLSnPb58-2)	39~41	1.5~2.0	余量	183~235	37	63	0.170	应用最广的锡铅钎料，可钎焊散热器、计算机零件及发动机过滤器等
HL604 (HLSnPb10)	89~91	≤0.15	余量	183~222	42	25	0.12	因含铅量低，特别适宜于食品器皿及医疗器材的钎焊
HL608	5.2~5.8	Ag 2.2~2.8	余量	295~305	34	—	—	具有较高的高温强度，用于铜及铜合金、钢的熔铁钎焊及火焰钎焊
HL610	59~61	≤0.8	余量	183~185	46	—	—	化学成分、力学性能及熔化温度与 HL600 相同，是一种含松香弱活性料芯的锡焊丝
HL613 (HLSnPb50)	49~51	≤0.8	余量	183~210	37	32	0.156	用于钎焊铜、黄铜、镀锌或镀锡铁皮等

注：括号内为冶金部部标钎料牌号。

表 2.19 铝基钎料的特性及用途

钎料牌号	化学成分/%					熔化温度 范围/℃	特点和用途
	Al	Si	Cu	Mg	其他		
HLAlSi7.5	余量	6.8~7.2	0.25	—	—	577~613	流动性差,对铝的熔蚀小。制成片状用于炉中钎焊和浸渍钎焊
HLAlSi10	余量	9~11	0.3	—	—	577~591	制成片状用于炉中钎焊和浸渍钎焊,钎焊温度比 HLAlSi7.5 低
HLAlSi12	余量	11~13	0.3	—	—	577~582	是一种通用钎料,适用于各种钎焊方法,具有极好的流动性和抗腐蚀性
HLAlSiCu10	余量	9.3~10.7	3.3~4.7	—	—	521~583	适用于各种钎焊方法,钎料的结晶温度间隔较大,易于控制钎料流动
Al12SiSrLa	余量	10.5~12.5	—	—	Sr 0.03 La 0.03	572~597	铈、镧的变质作用使钎焊接头延性优于用 HLAlSi12 钎料钎焊的接头延性
HL403	余量	10	4	—	Zn 10	516~560	适用于火焰钎焊、熔化温度较低,容易操作。钎焊接头的抗腐蚀性低于铝硅钎料
HL401	余量	5	28	—	—	525~535	适用于火焰钎焊、熔化温度较低,容易操作。钎料性能,接头抗腐蚀性比用铝硅钎料钎焊的低
B62	余量	3.5	20	—	Zn 25 Mn 0.3	480~500	用于钎焊固相线温度低的铝合金,钎焊接头的抗腐蚀性低于铝硅钎料
Al60GeSi	余量	4~6	—	—	Ge 35	440~460	铝基钎料中熔点最低的一种,适用于火焰钎焊、性能、价贵
HLAlSiMg7.5-1.5	余量	6.6~8.2	0.25	1~2	—	559~607	真空钎焊用片状钎料,根据不同的钎焊温度要求选用
HLAlSiMg10-1.5	余量	9~10	0.25	1~2	—	559~579	真空钎焊用片状、丝状钎料,钎焊温度比 HLAlSiMg7.5-1.5 和 HLAlSiMg10-1.5 钎料低
HLAlSiMg12-1.5	余量	11~13	0.25	1~2	—	559~569	

表 2.20 铜和铜锌钎料的特性及用途

钎料 型号	钎料 牌号	化学成分/%							熔化 温度 /℃	抗拉 强度 /MPa	用 途
		Cu	Sn	Si	Fe	Mn	Zn	其他			
BCu	—	≥99	—	—	—	—	—	—	1083	—	主要用于还原性气氛、惰性气氛和真空条件下钎焊低碳钢、低合金钢、不锈钢、镍、钨和钼等
BCu54Zn	H62	62±1.5	—	—	—	—	余量	—	900~905	314	应用最广的铜锌钎料,用来钎焊受力大的铜、镍、钢制零件
	H1CuZn46 (HL103)	54±2	—	—	—	—	余量	—	885~888	254	钎料延性较差,主要用来钎焊不受冲击和弯曲的铜及其合金零件
BCu48Zn	H1CuZn52 (HL102)	48±2	—	—	—	—	余量	—	860~870	205	钎料相当脆,主要用来钎焊不受冲击和弯曲的含铜量大于 68% 的铜合金
	H1CuZn36 (HL101)	64±2	—	—	—	—	余量	—	800~823	29	钎料极脆,钎焊接头性能差,主要用于黄铜的钎焊

续表

钎料 型号	钎料 牌号	化学成分/%							熔化 温度 /℃	抗拉 强度 /MPa	用 途
		Cu	Sn	Si	Fe	Mn	Zn	其他			
BCu48Zn	Cu-Mn- Zn-Si	余量	—	0.2~ 0.6	—	24~ 32	14~ 20	—	825~ 831	412	用于硬质合金的钎焊
	HLD2	余量	—	—	—	6~ 10	34~ 36	2~3	830~ 850	377	代替银钎料用于带铝的 钎焊
BCu60-ZnFe-R	丝 222	60± 1	0.85± 0.15	0.1± 0.05	0.8± 0.4	0.06± 0.03	余量	—	860~ 900	333	与 BCu60ZnSn-R 钎料 相同
BCu60ZnSn-R	丝 221	60± 1	1±0.2	0.25± 0.1	—	—	余量	—	890~ 905	343	可取代 H62 钎料以获 得更致密的钎缝,尚可作 为气焊黄铜用的焊丝
BCu58ZnMn	HL105	58± 1	—	—	0.15	4± 0.3	余量	—	880~ 909	304	锰可提高钎料的强度、延 性和对硬质合金的润湿能 力,广泛用于硬质合金刀 具、模具及采掘工具的钎焊
BCu48-ZnNi-R	—	48± 2	—	0.15± 0.1	—	—	余量	Ni 10±1	921~ 935	—	用于有一定耐热要求的 低碳钢、铸铁、镍合金零件 的钎焊,对硬质合金工具 也有良好的润湿能力

表 2.21 铜磷钎料的特性及用途

钎料 型号	钎料 牌号	化学成分/%					熔化温 度范围 /℃	抗拉 强度 /MPa	电阻率 / $\Omega \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$	用 途
		Cu	P	Ag	Sn	其他				
BCu95P	—	余量	5± 0.3	—	—	—	710~ 899	—	—	制成片状使用,流动性 低,特别适宜于电阻钎焊
BCu93P	HL201	余量	7± 0.4	—	—	—	710~ 793	470	0.28	流动性极好,可以流入 间隙很小的接头。钎料 脆,主要用于机电和仪表 工业,钎焊不受冲击载荷 的铜和黄铜零件
BCu92PSb	HL203	余量	6± 0.4	—	—	Sb 1.5~2.5	690~ 800	305	0.47	流动性稍差,用途与 BCu93P 相仿
BCu91PAg	HL209	余量	7± 0.2	2± 0.2	—	—	645~ 810	—	—	钎料中的银改善了它 的延性,在较大温度范围 内能填充接头间隙,用于 电冰箱、空调器、电机和 仪表行业
BCu89PAg	HL205	余量	5.8~ 6.7	5± 0.2	—	—	650~ 800	519	0.23	钎料延性和导电性得 到提高,流动性低,适宜 于钎焊间隙较大的零件
BCu80PAg	HL204	余量	4.8~ 5.3	15± 0.5	—	—	640~ 815	503	0.12	钎料延性和导电性进 一步改善。用于钎焊要 求比 BCu89PAg 钎料高 的场合
BCu80PSn-Ag	—	余量	5± 0.3	5± 0.5	10± 0.5	—	560~ 650	—	—	用于要求钎焊温度低 的铜及铜合金零件

续表

钎料 型号	钎料 牌号	化学成分/%					熔化温 度范围 /℃	抗拉 强度 /MPa	电阻率 / $\Omega \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$	用 途
		Cu	P	Ag	Sn	其他				
—	H1AgCu70-5	余量	5± 0.5	25± 0.5	—	—	650~ 710	—	—	延性和导电性是铜磷银 钎料中最好的一种,用于 钎焊要求高的电气接头
—	H1CuP6-3	余量	6± 0.3	—	3.5± 0.5	—	640~ 680	—	0.35	流动性好,钎焊接头性 能与 BA925CuZn 钎料 钎焊的接头性能相当,可 部分代替银钎料和铜磷 银钎料钎焊铜和铜合金
BCu86SnP	—	余量	5± 0.5	—	7.5± 0.5	Ni0.8± 0.4	—	—	—	用途与 H1Cu6-3 相似, Ni 的加入使钎料脆性增 大,但流动性提高
—	HL206	余量	6~10	2~ 10	3~ 10	—	620~ 660	—	—	用途与 H1CuP6-3 相 似,但钎焊温度更低

钎料的选用须从使用要求(如力学性能、工作温度、耐蚀性、导电性等)、钎料与母材的匹配、钎料温度和加热方法以及经济性等方面综合考虑。各种材料组合时所适用的钎料列于表 2.22。

表 2.22 各种材料组合时所适用的钎料

项目	Al 及 其合金	Be、V、Zr 及其 合金	Cu 及 其合金	Mo、Nb、 Ta、W 及 其合金	Ni 及 其合金	Ti 及 其合金	碳钢及 低合金钢	铸铁	工具钢	不锈钢
Al 及其合金	Al- ^① Sn-Zn Zn-Al Zn-Cd									
Be、V、Zr 及其合金	不推荐	无规定								
Cu 及其合金	Sn-Zn Zn-Cd Zn-Al	Ag-	Ag- Cd- Cu-P Sn-Pb							
Mo、Nb、Ta、W 及其合金	不推荐	无规定	Ag-	无规定						
Ni 及其合金	不推荐	Ag-	Ag- Au- Cu-Zn	Ag- Cu- Ni-	Ag- Ni- Au- Pb- Cu- Mn-					
Ti 及其合金	Al-Si	无规定	Ag-	无规定	Ag-	无规定				
碳钢及 低合金钢	Al-Si	Ag-	Ag- Sn-Pb Au Cu-Zn Cd	Ag- Cu Ni-	Ag- Sn-Pb Au- Cu- Ni-	Ag-	Ag-Cu-Zn Au- Ni- Cd-Sn-Pb Cu			
铸铁	不推荐	Ag-	Ag- Sn-Pb Au Cu-Zn Cd	Ag- Cu Ni-	Ag- Cu ^② Cu-Zn ^③ Ni-	Ag-	Ag- Cu-Zn Sn-Pb	Ag- Cu-Zn Ni- Sn-Pb		

续表

项目	Al 及其合金	Be、V、Zr 及其合金	Cu 及其合金	Mo、Nb、Ta、W 及其合金	Ni 及其合金	Ti 及其合金	碳钢及低合金钢	铸铁	工具钢	不锈钢
工具钢	不推荐	不推荐	Ag-Cu-Zn Ni	不推荐	Ag-Cu Cu-Zn Ni	不推荐	Ag-Cu Cu-Zn Ni	Ag-Cu-Zn Ni	Ag-Cu Cu-Ni	
不锈钢	Al-Si	Ag	Ag-Cd Cu-Sn-Pb Cu-Zn	Ag-Cu Ni	Ag-Ni Au-Pb Cu-Sn-Pb Mn	Ag	Ag-Sn-Pb Au-Cu Ni	Ag-Cu Ni-Sn-Pb	Ag-Cu Ni	Ag-Ni Au-Pb Cu-Sn-Pb Mn

① Al-为铝基钎料。

② Cu 为纯铜钎料。

③ Cu-Zn 为铜锌钎料。

钎料的供应状态有丝状、片状、铸条、粉状及膏状等多种形态，根据需要可制成专用的圈、环片等，铝钎料还能与母材预制成双金属板（即铝钎焊板），可根据不同的使用要求选用。

2.3 钎焊用钎剂

2.3.1 对钎剂的基本要求

① 钎剂的熔点和最低活性温度比钎料低，在活性温度范围内有足够的流动性。在钎料熔化之前钎剂就应熔化并开始起作用，去除钎缝间隙和钎料表面的氧化膜，为液态钎料的铺展润湿创造条件。

② 应具有良好的热稳定性，使钎剂在加热过程中保持其成分和作用稳定不变。一般说来，钎剂应具有不小于 100℃ 的热稳定温度范围。

③ 能很好地溶解或破坏被钎焊金属和钎料表面的氧化膜。钎剂中各组分的汽化（蒸发）温度比钎焊温度高，以避免钎剂挥发而丧失作用。

④ 在钎焊温度范围内钎剂应黏度小、流动性好，能很好地润湿钎焊金属、减小液态钎料的界面张力。

⑤ 熔融钎剂及清除氧化膜后的生成物密度应较小，有利于上浮，呈薄膜层均匀覆盖在钎焊金属表面，有效地隔绝空气，促进钎料的润湿和铺展，不致滞留在钎缝中形成夹渣。

⑥ 熔融钎剂残渣不应钎焊金属和钎缝有强烈的腐蚀作用，钎剂挥发物的毒性小。

2.3.2 钎剂的类型及特性

钎剂的组成物质主要取决于所要清除氧化物的物理化学性质。构成钎剂的组成物质可以是单一组元（如硼砂、氯化锌等），也可以是多组元系统。多组元系统通常由基体组元、去膜组元和活性组元组成。

钎剂的分类与钎料分类相适应，通常分为软钎剂、硬钎剂、铝用钎剂等，分别适用于不同的场合。各种钎焊熔剂和气体钎剂的分类见表 2.23。

(1) 软钎剂

软钎剂是指在 450℃ 以下钎焊用的钎剂，由成膜物质、活化物质、助剂、稀释剂和溶剂等组成，可分为无机软钎剂和有机软钎剂两类。

表 2.23 各种钎焊熔剂和气体钎剂的分类

钎剂分类		物质分类	物质组成
软钎剂	无机软钎剂 (腐蚀性钎剂)	无机酸	盐酸、氢氟酸、磷酸
		无机盐	氯化锌、氯化铵、氯化锌-氯化铵
	有机软钎剂 (弱腐蚀和无腐蚀)	弱有机酸	乳酸、硬脂酸、水杨酸、油酸
		有机胺盐	盐酸苯胺、磷酸苯胺、盐酸胍、盐酸二乙胺
		胺和酰胺类	尿素、乙二胺、乙酰胺、二乙胺、三乙醇胺
		天然树脂	松香、活化松香
硬钎剂	硼砂或硼砂基		
	硼酸或硼酐基		
	硼砂-硼酸基		
	氟盐基		
铝用钎剂	铝用软钎剂	铝用有机软钎剂(QJ204)	
		铝用反应钎剂(QJ203)	
	铝用硬钎剂	氯化物	
		氧化物-氯化物	
气体钎剂	炉中钎焊用气体钎剂	活性气体	氯化氢、氟化氢、三氯化硼
		低沸点液化化合物	三氯化硼、三氯化磷
		低升华固态化合物	氟化铵、氟硼酸铵、氟硼酸钾
	火焰钎焊用气体钎剂 (硼有机化合物蒸气)	硼酸甲酯蒸气	
		硼甲酯酯蒸气	

无机软钎剂具有很高的化学活性，去除氧化物的能力很强，热稳定性好，能促进液态钎料对钎焊金属的润湿，保证钎焊质量。这类钎剂适应钎焊温度范围较宽，但其残渣有强烈的腐蚀作用，故又称为腐蚀性软钎料，钎焊后必须清除干净。无机软钎剂可用于不锈钢、耐热钢、镍基合金等。有机软钎剂有水溶性和天然树脂（松香）之分，对母材几乎没有腐蚀性，故称非腐蚀性软钎剂。常用软钎剂的成分和性能见表 2.24。

表 2.24 常用软钎剂的成分和性能

类别	钎剂名称 (或型号)	化学成分 /%	钎焊温度 /℃	特 点
无机盐 软钎剂	氯化锌溶液 (FS312A)	ZnCl_2 40, H_2O 60	290~350	ZnCl_2 去除氧化膜的作用在于形成络合酸而溶解氧化物，氯化铵为活化剂，可提高钎焊性能，但去除氧化膜的能力有限，故主要是锡铅钎料钎焊钢、铜及铜合金时使用
	氯化锌-氯化铵 溶液(FS311A)	ZnCl_2 40, H_2O 55 NH_4Cl 5	180~320	
	钎剂膏	ZnCl_2 20, 凡士林 75 NH_4Cl 5	180~320	
	氯化锌盐酸溶 液(FS322A)	ZnCl_2 25, H_2O 50 HCl 25	180~320	有较强的去除氧化物能力，当锡铅钎料钎焊铬钢、不锈钢、镍铬合金时应选用这类钎剂或 ZnCl_2 - NH_4Cl - HCl 溶液钎剂
	剂 205	ZnCl_2 50, NaF 5 NH_4Cl 15, CdCl_2 30	250~400	是在 ZnCl_2 - NH_4Cl 钎剂基上加入 CdCl_2 和 NaF 而成，可提高钎剂的熔点，配合钼基、钨基钎料钎焊铝青铜、铝黄铜等
无机酸 软钎剂	磷酸 (FS321)	H_3PO_4 40~60 水 60~40	—	无机酸钎剂有磷酸、盐酸和氢氟酸等，通常以水溶液或酒精溶液形式使用，也可与凡士林调成膏状使用 磷酸使用起来方便、安全，具有较强的去除氧化物的能力，钎焊铝青铜、不锈钢等合金时最为有效，也是最常用的无机酸软钎剂 盐酸、氢氟酸，能强烈腐蚀金属，析出有害气体，故很少单独使用，一般仅作钎剂的添加成分

续表

类别	钎剂名称 (或型号)	化学成分 /%	钎焊温度 /℃	特 点
水溶性 有机 软钎剂	FS213	乳酸 15, 水 85 (活性温度 180~280℃) 盐酸胍 5, 水 95 (活性温度 150~330℃)	—	水溶性有机软钎剂的组成物质包括有机酸(如乳酸、水杨酸、柠檬酸等)、有机胺和酰胺类(如乙二醇、乙酰胺等)、胺基盐酸盐(盐酸乙二胺等)、醇类(如乙二醇、丙三醇)和水溶性树脂及其他一些附加成分等 有机酸和有机胺盐类有机软钎剂有较强的去除氧化物的能力, 热稳定性尚好, 残渣有一定的腐蚀性, 属弱腐蚀性钎剂, 主要用于电气零件的钎焊
松香类 有机 钎剂	松香 (FS111B) FS111A	松香 100 松香 25, 酒精 75	150~300	松香是一种天然树脂, 能溶于酒精、甘油、丙酮等而不溶于水, 在温度高于 150℃ 时, 能溶解银、铜、锡的氧化物, 适用于铜、锡、锡、银的钎焊
	FS113A	松香 30, 水杨酸 2.8, 三乙醇胺 1.4, 酒精余量	150~300	适用于铜及铜合金的焊接
	RJ12	松香 30, 氯化锌 3, 氯化氨 1, 酒精 66	290~360	适用于铜、铜合金、镀锌铁及镍等的钎焊
	FS112A	松香 24, 三乙醇胺 2, 盐酸二乙胺 4, 酒精 70	200~350	

(2) 硬钎剂

硬钎剂是指在 450℃ 以上钎焊用的钎剂。黑色金属常用的硬钎剂的主要组分是硼砂、硼酸及其混合物。为了得到合适的熔点和增强去除氧化物的能力, 可以添加各种碱金属或碱土金属的氟化物、氟硼酸盐等组成。

常用硬钎剂的成分、特点及用途见表 2.25。其中 FB102 钎剂是应用最广泛的通用钎剂; FB103 钎剂的钎焊温度最低, 特别适用于银铜锌锡钎料; FB104 钎剂不含 KBF_4 , 钎剂不易挥发, 在加热速度较慢的情况下仍可保持较长时间的活性。

表 2.25 常用硬钎剂的成分、特点及用途

牌 号	化学成分/%	熔点/℃	钎焊温度/℃	特点及用途
YJ-1	硼砂 100	741	850~1150	现有硬钎剂主要是以硼砂、硼酸以及它们的混合物作基体, 为了得到合适的熔点, 增强去除氧化物的能力, 而由添加的各种碱金属或碱土金属的氟化物、氟硼酸盐等组成, 硼砂或硼砂与硼酸的混合物主要用于铜基钎料钎焊铜及铜合金、碳素钢等
YJ-2	硼砂 25, 硼酸 75	766		
YJ-6	硼砂 15, 硼酸 80, CuF_2 5	—		
YJ-7	硼砂 50, 硼酸 35, $\text{KF}15$	—	650~850	是银基钎料钎焊铜及铜合金、合金钢、不锈钢和高温合金等的钎剂, 能有效地清除各种氧化物, 促进钎料漫流, 但易吸潮。钎焊后用质量分数为 15% 的柠檬酸水溶液刷洗钎焊的接头处, 以防止残余钎剂的腐蚀
QJ101	H_3BO_3 30~31 KBF_4 68~71	500	550~850	
QJ102	KF (脱水) 40~44 B_2O_3 33~37 KBF_4 21~25	550	600~850	
QJ103	$\text{KBF}_4 > 95$ $\text{K}_2\text{CO}_3 < 5$	530	550~750	
QJ104	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 49~51 H_3BO_3 34~36 KF 14~16	650	650~850	银基钎料炉中钎焊铜及铜合金、钢和不锈钢等。能有效地清除各种金属的氧化物, 促进钎料漫流, 易吸潮
FB101	硼酸 30, 氟硼酸钾 70		550~850	银钎料钎剂
FB102	无水氟化钾 40, 氟硼酸钾 25, 硼酐 35		600~850	应用最广的银钎料钎剂
FB103	氟硼酸钾 > 95, 碳酸钾 < 5		550~750	用于银铜锌锡钎料
FB104	硼砂 50, 硼酸 35, 氟化钾 15		650~850	银基钎料炉中钎焊

硼砂和硼酸的混合物是应用很广泛的钎剂,但它们的活性温度很高,均在 800℃ 以上,因此也只适合于 800℃ 以上的钎焊,一般只能配合铜基钎料使用。去除氧化物的能力不强,不能去除 Cr、Si、Al、Ti 等的氧化物,故不能用于钎焊含这些元素的合金钢、不锈钢和高温合金等。这类残渣呈玻璃硬壳状,不溶于水,虽腐蚀性不大,但清除困难。为了使钎剂得到合适的熔点,增强去除氧化物的能力,常添加各种碱金属或碱土金属的氧化物、氟硼酸盐等。

(3) 铝用钎剂

铝表面的氧化膜致密、稳定。钎焊铝及铝合金时必须采用专门的铝用钎剂。铝用钎剂按其使用温度分为铝用软钎剂和铝用硬钎剂两类。铝用软钎剂又分为有机钎剂和反应钎剂,其成分及钎焊温度见表 2.26。铝用硬钎剂的基本组成是碱金属及碱土金属的氯化物,其成分及用途列于表 2.27。

表 2.26 常用的铝用软钎剂

类别	牌号	名称	化学成分/%	钎焊温度/℃	特点及用途
有机软钎剂	QJ204 FS212-BA1	—	三乙醇胺 82.5 氟硼酸胺 5 氟硼酸铜 10 氟硼酸锌 2.5	180~275	铝用有机钎剂是以三乙醇胺作溶剂加入几种氟硼酸盐组成,可在 180~270℃ 温度下破坏 Al_2O_3 膜,残渣对焊件有一定的腐蚀性,主要用于钎焊铝及铝合金,也可用于钎焊铝青铜和铝黄铜
	FS212-BA1	—	三乙醇胺 83 氟硼酸 10 氟硼酸铜 7		
	1060X	—	三乙醇胺 62 乙醇胺 20 $Zn(BF_4)_2$ 8 $Sn(BF_4)_2$ 5 NH_4BF_4 5	250	
	1160U	—	三乙醇胺 37 松香 30 $Zn(BF_4)_2$ 10 $Sn(BF_4)_2$ 8 NH_4BF_4 15	250	
反应软钎剂	FS311-BA1	—	$ZnCl_2$ 90 NaF 2 NH_4Cl 8	300~400	反应钎剂主要组成为 Zn、Sn 等重金属氯化物。为提高活性,添加了少量锂、钠、钾的卤化物。一般都含 NH_4Cl 或 NH_4Br 以改善润湿性及降低熔点 当温度大于 270℃ 时能有效地破坏 Al_2O_3 膜,其作用是重金属氟盐透过氧化铝膜裂缝并发生反应而破坏氧化铝与铝的结合。极易吸潮而失去活性,应密封保存。主要用于钎焊铝及铝合金,也可用于铜及铜合金、铜件等
	QJ203	铝电熔钎焊用钎剂	$ZnCl_2$ 53~58 $SnCl_2$ 27~30 NH_4Br 13~16 NaF 1.7~2.3	270~380	
	φ220A (前苏联)	—	$ZnCl_2$ 90 NH_4Cl 8 KF 1.2 LiF 0.6 NaF 0.2	320~450	
	φ220A (前苏联)	—	KCl 35 LiCl 30 ZnF_2 10 $CdCl_2$ 15 $ZnCl_2$ 10	390	

表 2.27 铝用硬钎剂成分及用途

牌 号	名 称	化学成分 /%	熔点 /℃	钎焊温度 /℃	特点及用途
QJ201	铝 钎剂	LiCl 31~35 KCl 47~51 ZnCl ₂ 6~10 NaF 9~11	420	450~ 620	极易吸潮,能有效地去除氧化铝膜,促进钎料在铝合金上漫流。活性极强,适用于在 450~620℃ 温度范围火焰钎焊铝及铝合金,也可用于某些炉中钎焊,是一种应用较广的铝钎剂,工件须预热至 550℃ 左右
QJ202	铝钎剂	LiCl 40~44 KCl 26~30 ZnCl ₂ 19~24 NaF 5~7	350	420~ 620	极易吸潮,活性强,能有效地去除 Al ₂ O ₃ 膜,可用于火焰钎焊铝及铝合金,工件须预热至 450℃ 左右
QJ206	高温 铝钎剂	LiCl 24~26 KCl 31~33 ZnCl 7~9 SrCl ₂ 25 LiF 10	540	550~ 620	高温铝钎焊钎剂,极易吸潮,活性强,适用于火焰或炉中钎焊铝及铝合金,工件须预热至 550℃ 左右
QJ207	高温 铝钎剂	KCl 43.5~47.5 CaF ₂ 1.5~2.5 NaCl 18~22 LiF 2.5~4.0 LiCl 25~29.5 ZnCl 1.5~2.5	550	560~ 620	与 Al-Si 共晶类型钎料相配,可用于火焰或炉中钎焊纯铝、防锈铝及锻铝等,能取得较好效果。极易吸潮,耐腐蚀性比 QJ201 好,黏度小,湿润性强,能有效地破坏 Al ₂ O ₃ 氧化膜,焊缝光滑
Y-1 型	高温 铝钎剂	LiCl 18~20 KCl 45~50 NaCl 10~12 ZnCl 7~9 NaF 8~10 AlF ₃ 3~5 PbCl ₂ 1~1.5	—	580~ 590	氟化物-氯化物型高温铝钎剂。去膜能力极强,保持活性时间长,适用于氧-乙炔火焰钎焊。可顺利地钎焊工业纯铝、防锈铝、锻铝、铸铝等,也可钎焊超硬铝等较难焊的铝合金,若用煤气火焰钎焊,效果更好
No. 17 (YT17)	—	LiCl 41, KCl 51 KF-AlF ₃ 8	—	500~ 560	适用于浸渍钎焊
—	—	LiCl 34, KCl 44, NaCl 12, KF-AlF ₃ 10	—	550~ 620	
QF	氟化物 共晶钎剂	KF 42, AlF ₃ 58(共晶)	562	>570	具有“无腐蚀”的特点,纯共晶(KF-AlF ₃)钎剂可用于普通炉中钎焊,火焰钎焊纯铝或 LF21 防锈铝
—	氟化物 钎剂	KF 39, AlF ₃ 56, ZnF ₂ 0.3, KCl 4.7	540	—	活性时间为 30s,耐腐蚀性好。可为粉状,也可调成糊状,适用于手工、炉中钎焊
129A	—	LiCl-NaCl-KCl-ZnCl ₂ -CdCl ₂ -LiF	550	—	可用于防锈铝合金的火焰钎焊
171B	—	LiCl-NaCl-KCl-TiCl-LiF	490	—	

注: 1. 钎焊时, 焊前应工件钎焊部分洗刷干净, 工件还应预热。

2. 钎剂不宜沾得过多, 一般薄薄一层即可, 焊缝宜一次钎焊完。

3. 钎焊后接头必须用热水反复冲洗或煮沸, 并在 50~80℃ 的质量分数为 2% 的醋酐 (C₂H₃O₂) 溶液中保持 15min, 再用冷水冲洗, 以免发生腐蚀。

(4) 气体钎剂

气体钎剂是一种特殊类型的钎剂,按钎焊方法可分为炉中钎焊用气体钎剂和火焰钎焊用气体钎剂。这类钎剂最大的优点是钎焊后没有钎剂残渣,钎焊接头不需清洗。但这类钎剂及其反应物大多有一定的毒性,使用时应采取相应的安全措施。常用气体钎剂的种类和用途见表 2.28。

表 2.28 常用气体钎剂的种类和用途

气体	适用方法	钎焊温度/℃	适用材料
三氯化硼	炉中钎焊	1050~1150	不锈钢、耐热合金
三氯化硼	炉中钎焊	300~1000	铜及铜合金、铝及铝合金、碳钢及不锈钢
三氯化磷	炉中钎焊	300~1000	
硼酸甲酯	火焰钎焊	≥900	碳钢、铜及铜合金

在炉中钎焊中可用作钎剂的气体主要是气态的无机卤化物,包括氯化氢、氟化氢、三氯化硼、三氯化硼和三氯化磷等气体。氯化氢和氟化氢对母材有强烈的腐蚀性,一般不单独使用,只在惰性气体保护钎焊中添加少量来提高去膜能力。

三氯化硼是最常用的炉中钎焊用气体钎剂,特点是对母材的腐蚀作用小,去膜能力强,能保证钎料有较好的润湿性,可用于钎焊不锈钢和耐热合金。但去膜后生成的产物熔点较高,只适合于高温钎焊(1050~1150℃)。三氯化硼可以由放在钎焊容器中的氟硼酸钾在 800~900℃ 完全分解产生,并添加在惰性气体中使用,其体积分数应控制在 0.001%~0.1% 的范围内。

三氯化硼和三氯化磷气体对氧化物有更强的活性,且反应生成的产物熔点较低或易挥发,可在包括高温和中温的较宽温度范围(300~1000℃)进行碳钢及不锈钢、铜及铜合金、铝及铝合金的钎焊。该气体钎剂也应添加到惰性气体中使用,并使体积分数控制在 0.001%~0.1% 的范围内。

火焰钎焊时,可采用硼有机化合物的蒸气作为气体钎剂,如硼酸甲酯蒸气等。该蒸气在燃气中供给,并在火焰中与氧反应生成硼酐,从而起到钎剂作用,可在高于 900℃ 的温度钎焊碳钢、铜及铜合金等。

2.3.3 钎剂与钎料的搭配

(1) 钎剂的选择

钎剂的功能部分可以分为基质、去膜剂和界面活性剂。有的钎剂这三部分功能可以明显划分,如铝钎剂。多数钎剂的功能部分并不明显划分,但确实存在。基质是钎剂的主要成分,它控制着钎剂的熔点。基质熔化后覆盖在焊接部位的表面起到隔绝空气的作用。同时它又是钎剂中其他功能组元的溶剂。为了配合钎料的熔点,钎剂的熔点应低于钎料熔点 10~30℃。特殊应用情况下,也可采用钎剂的熔点稍高于钎料的熔点。

去膜剂的作用是通过物理化学的过程去除、破碎或松脱母材的表面膜,使得熔化的钎料能够润湿新鲜的母材表面。界面活性剂的作用是起到进一步降低熔化钎料与母材间的界面张力,使熔化钎料得以在母材表面铺展。

钎剂的选择一般根据氧化膜的性质决定。偏碱性的氧化膜(如 Fe、Ni、Cu 等的氧化物)常使用酸性的含硼酸酐(B_2O_3)的钎剂;偏酸性的氧化膜(如 SiO_2)常采用含碱性 Na_2CO_3 的钎剂,使生成易熔的 Na_2SiO_3 而进入熔渣。

钎焊含 Cr、Ti、Mo、W 等元素的合金钢或耐热钢时,由于这些元素的氧化物是酸性

的,而基体元素 Fe 的氧化物是偏碱性的,因此常在硼酸酐中加入部分强碱性的碱金属或碱土金属的氟化物,使钎剂具有某种双重性能而提高钎剂的活性。为了同时调节钎剂的熔点,在 850℃ 以下常添加 LiF、NaF 或 KF,而在 850℃ 以上常添加 CaF_2 。钎焊结构钢、耐蚀钢和耐热钢以及铜、银、金等合金时,有时希望在较低温度下钎焊,则常在硼酸酐中加入氟硼酸钾或氟硼酸钠。

铝合金和镁合金钎焊用钎剂主要由氯化物、氟化物和一些重金属离子构成。但这类钎剂钎焊后清洗比较困难,稍有不慎便会引起腐蚀。对于较大面积的搭接,钎缝中的夹渣很难避免,容易形成蚁窝状缺陷。近 20 余年发展的 Nocolok 钎剂,因为不溶于水、不吸潮而成为无腐蚀的钎剂。这主要是由 AlF_3 和 KF 系中两个中间化合物 K_3AlF_6 和 KAlF_4 共晶熔盐构成。近年来又发展了 AlF_3 -CsF 和 AlF_3 -CsF-KAlF₄ 钎剂,含 CsF 成分的钎剂去除镁氧化膜的能力较强,适合钎焊 Mg 含量较高的铝合金和镁合金。

钛合金钎剂主要由碱金属、碱土金属的氯化物和氟化物组成,但由于钛的氧化膜难以去除,其界面活性剂常用活性更高的 AgCl 和 SnCl_2 。

(2) 钎剂与钎料的搭配

钎焊时,钎料最好在钎剂完全熔化后 5~10s 即开始熔化,这时正是钎剂的活性高峰。这种时间间隔主要取决于钎剂以及钎料本身的熔化温度,也可以通过加热速度来进行一定的调节。快速加热将缩短钎剂和钎料的熔化温度时间间隔,缓慢加热则延长两者的时间间隔。

对于升温速度缓慢的工作,钎剂的熔化温度要选择较高者,升温越慢,应选择钎剂熔化温度越高者,有时甚至略超过钎料液相线的温度。钎剂过早地熔化将使钎料熔化时赶不上钎剂的活性高峰。对于熔化温度区间大的钎料,即钎料的固相线和液相线的温度相隔较远,钎焊时需要快速加热,否则开始熔化的低熔部分随钎缝流失而产生熔析,留下一个不熔的钎料瘤,这时钎剂开始的熔化温度应当选择较高者,设置接近或略高于钎料的固相线以推迟钎剂活性高峰到来的时间,从而避免钎料中低熔部分的过早流失。

钎焊温度下如果钎料与母材的液相互溶度很大,钎料熔化后不宜停留较长时间,以免引起严重的熔蚀。应当控制钎剂熔化的时间,使钎剂的活性高峰在钎料熔化时正好达到,以保证钎料熔化后瞬时流走。

钎剂和钎料熔化温度区间的控制,炉中钎焊时需要根据具体情况设置升温程序。有时需要快速升温甚至将炉温烧至高温,远超过母材的熔点,送入工件,完成钎焊过程后立即出炉。有时工件质量或体积较大,传热需要一定的时间,则常常采用加快炉内气氛的流动以加速工件升温的方法。

2.4 钎焊材料的使用及安全

2.4.1 钎焊材料的使用

钎焊材料主要包括钎料和钎剂,钎料是钎焊时的填充材料,焊件依靠熔化的钎料连接起来。而钎焊过程中熔态的钎料与母材的润湿主要取决于钎剂的作用。因此钎料与钎剂是钎焊过程中重要的组成部分,它们的使用和保管措施对于钎焊过程十分重要。

(1) 钎焊材料的使用

钎焊材料使用时应注意的问题:

① 不要让熔态钎料在钎缝中作过远的流动,以免熔蚀母材和钎缝组织不均匀。

② 如果钎料质量相对于母材来说过于细小,一定将钎料放在稳定的位置(如沟槽中),以免因热容量小,先熔而滚走。如果母材各部件质量相差很大,钎料应当靠在大质量的部

件上。

③ 当钎焊加热热源主要依靠辐射传热时,例如火焰自动钎焊和炉中钎焊,则要防止母材到被辐射加热钎焊温度前过早熔化而滚走。

④ 用无水丙酮将氯化物钎剂调成糊状,把钎料粘在需要的位置上,并在上面用少量钎剂糊覆盖,可以减少上述钎焊过程中的问题。

(2) 钎焊材料的储存

① 钎剂应装入不影响其性能的容器(如桶)中,并密封,不得有渗漏痕迹;每个容器应标明制造厂名、商标、钎剂类型和出厂日期,并具有检验合格证。

② 液态钎剂外包装上应注明“易燃液体”的标志,具体参照国家标准 GB/T15829.1《软钎焊用钎剂分类、标记与包装》规定操作;运输途中应避免光、防热及防止震动和冲击。

③ 钎剂应放在 5~35℃ 阴凉处保存,钎剂的有效储存期为半年。

④ 钎料表面极易与大气发生反应生成锈蚀膜,主要是各种氧化物(还可能包括氯化物、硫化物、碳酸盐等),将严重影响钎料的钎焊性,因此必须将钎料储存在密闭容器中。

2.4.2 钎焊材料的安全注意事项

钎焊材料(特别是钎剂)的使用过程中,通风和对毒物的防护措施是十分必要的。钎料中含有某些在加热时容易挥发的有毒物质,如 Cd、Be、Zn、Pb 等,钎剂中含有氟化物、氯化物和硼化物等。所以在钎焊材料的使用中,必须采取妥善的防护措施,以免污染钎焊环境,损害操作者的健康。

钎焊前清洗零件及钎料时,使用的清洗剂(如酸类、碱类、氯化烃等有机溶剂)也必须严格采取防护措施,保证环境不受有毒物的污染。

通常采用的有效防护措施是室内通风。可将钎焊过程中所产生的有毒烟尘和毒性物质的挥发气氛排出室外,有效保证操作者的健康和安全。当钎焊金属和钎料中含有 Cd、Be、Zn、Pb 等有毒性金属以及钎剂中含有氟化物时,要严格采取有效的防护措施。

① 铍(Be)在原子能、宇航和电子工业中应用价值很高,但是毒性大。因此铍和氧化铍钎焊时,最好在密闭通风设备中进行,并应有净化装置,达到规定标准才能排出室外。

② 镉(Cd)通常是为了改善钎焊工艺性在钎料中加入的元素。加热易挥发,可从呼吸道和消化道吸入人体,能引起急性中毒,因此除了应在密闭通风设备中进行钎焊外,还要尽可能降低 Cd 的使用量。

③ 铅(Pb)是软钎料中主要的成分,加热至 400~500℃ 时即可产生大量的 Pb 蒸气,在空气中生成氧化铅,Pb 蒸气通常为慢性中毒,因此为了对 Pb 蒸气进行防护,规定车间空气中的最高允许浓度,铅烟为 0.03mg/m³,铅尘为 0.05mg/m³。

④ 锌(Zn)及其化合物 ZnCl₂ 在钎焊时,均易挥发生成锌烟,人体吸入可引起金属烟雾热中毒现象,因此,防止烟雾接触人体,必须应用个人防护设备和良好的通风环境,当皮肤接触 ZnCl₂ 溶液时,要用大量清水冲洗接触部位。

⑤ 使用含有氟化物的钎剂时,必须在有通风的条件下进行钎焊,或者使用个人防护装备。当用含氟化物钎剂进行浸渍钎焊时,排风系统必须保证环境浓度在规定的范围内,现行国家规定的最大允许浓度为 1mg/m³。

第3章 火焰钎焊

火焰钎焊是用可燃气体或液体燃料的汽化产物与氧或空气混合燃烧所形成的火焰进行钎焊加热的。火焰钎焊通用性强，工艺过程简单，又能保证必要的钎焊质量，因此应用广泛，主要用于以铜基钎料、银基钎料钎焊碳钢、低合金钢、不锈钢、铜及其合金等薄壁或小型焊件。

3.1 火焰钎焊的特点及设备

3.1.1 火焰钎焊的特点及应用

(1) 火焰钎焊的特点

火焰钎焊装置简单，钎焊前需对工件进行表面清洗，钎焊后接头也必须进行表面清理，去掉残留在接头上的钎剂和渣壳。钎焊过程中受氧化环境的影响，火焰钎焊适用于活性较小并且不需要专门保护的焊件的连接。

火焰钎焊的特点如下。

① 火焰钎焊在空气中完成，不需要保护气体，通常需要使用钎剂。但在含磷钎料钎焊紫铜的场合，高温下与氧化物结合的磷，防止了自由氧化物的形成，可润湿接头表面，具有自钎剂的作用，因此即使不加钎剂，也可以取得很好的效果。

② 火焰钎焊钎料选择范围广，从低温的银基钎料到高温的铜基、镍基钎料都可以应用。丝状、片状、预成形或膏状钎料也都可以应用于火焰钎焊。

③ 操作方便、灵活，也可以实现自动化操作。对于少量的接头，单人使用手持式焊炬可以操作完成，对于大批量生产时，可采用半自动或全自动火焰钎焊系统。

④ 火焰钎焊用燃气种类多，来源方便，可根据成本、可获得性和要求加热的数量来选择；并且钎焊温度可以通过气体火焰调整。

⑤ 设备成本低，操作技术容易掌握。便携式设备还可以使用在其他要求火焰加热的应用中，用于氧-燃气焊接的设备也可用于火焰钎焊。

火焰钎焊的缺点是，手工火焰钎焊时加热温度难以精确掌握，因此要求操作人员应具有较多的经验；另外，火焰钎焊是一个局部加热过程，容易在母材中引起应力或变形。

(2) 火焰钎焊的应用

火焰钎焊应用广泛，这种钎焊方法不受产品数量的限制，一个接头到几百万个接头都可以采用火焰钎焊进行加工。手工火焰钎焊使用在小批量的生产及需要在多个位置进行局部钎焊的接头中。由于火焰钎焊的操作灵活性较强，在安装和维修现场也常采用火焰钎焊。

大批量生产时，使用半自动或全自动火焰钎焊，在这些场合下，要求达到某种水平的自动化，如中等规模的产品数量能够使用简单的往返系统，采用人工放置构件、钎料和钎剂。大批量的生产可以安排在具有高速加热能力，并且采用具有自动装卸构件、自动添加钎焊材料的旋转台或联机输送带完成。

在加热器具、空调器和制冷工业常采用火焰钎焊连接大量的管路接点；在压缩机行业，管子与压缩机壳体也可采用手工火焰钎焊或半自动钎焊；在管件工业，大部分黄铜和紫铜水龙头组件是靠自动火焰钎焊连接的。此外，碳素工具钢、汽车零部件、家具配件、阀门等也

大量靠火焰钎焊进行加工生产。

火焰钎焊的应用仍受氧化环境、操作技术的影响较大,其限制因素包括:

- ① 火焰钎焊表面有钎剂和热垢残留,焊后必须彻底清理,否则会引起潜在的腐蚀。
- ② 手工火焰钎焊质量受操作技术水平影响较大,手工钎焊劳动强度大。
- ③ 厚重件采用火焰钎焊加热时,钎焊区域的温度很难超过 1000℃。
- ④ 活性较强的材料(如钛、锆等)不适合采用火焰钎焊,采用含镉钎料,如钎焊温度超过镉的蒸发温度,将危害人体健康。

3.1.2 火焰钎焊设备

火焰钎焊设备有手工和自动钎焊设备两种,本质上与氧-燃气焊接设备相同。无论哪种,都必须满足能够将燃气和氧气(或空气)正确混合,以保证得到适当的流速送到焊炬的喷嘴。自动钎焊设备必须具备自动添加钎剂和自动加热、冷却装置,以形成满足使用要求的接头。

(1) 手工火焰钎焊装置

火焰钎焊设备与氧-燃气焊接设备主要的区别是喷嘴不同。手工火焰钎焊装置如图 3.1 所示。主要组成部分包括:焊炬、喷嘴、气体存储设备、传输气体软管或管路系统、安全装置及其他辅助装置等。

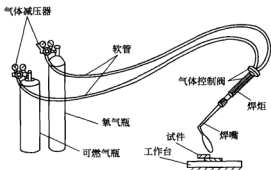


图 3.1 手工火焰钎焊装置

① 焊炬及喷嘴 火焰钎焊焊炬是由枪体、混合室和喷嘴组成。枪体当作手柄并带有阀门以控制氧气和燃气流出;枪体为钎焊操作者提供了方便控制火焰移动的设计。控制阀调节气流与应用要求相匹配,它也允许改变氧与燃气的比例,并具有产生碳化焰、还原焰和中性焰的能力。为适应不同的加热要求,枪体被加工制作成各种尺寸。

混合室提供了燃气和氧气的混合,同时混合室还起到散热器的作用,有助于防止回火火焰进入焊炬。按燃气与氧气在混合室中的混合方式,应用广泛的焊炬有等压式和射吸式两种。射吸式焊炬的结构如图 3.2 所示,其规格和性能见表 3.1。

表 3.1 射吸式焊炬规格和性能

型号	焊接低碳钢厚度 /mm	氧气压力 /MPa	乙炔压力 /MPa	可换焊 嘴个数	焊嘴孔径范围 /mm	气体消耗量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	
						氧	乙炔
H01-2	0.5~2	0.1~0.25	0.001~0.12	5	0.5~0.9	0.033~0.15	40~170
H01-6	2~6	0.2~0.4			0.9~1.3	0.15~0.37	170~430
H01-12	6~12	0.4~0.7			1.4~2.2	0.37~1.1	430~1210
H01-20	12~20	0.6~0.8			2.4~3.2	1.25~2.25	1500~2600

射吸式焊炬主要靠喷射器(即喷嘴和射吸管)的射吸作用来调节氧气和乙炔的流量,保证乙炔与氧的混合气体具有固定的成分,使火焰稳定燃烧。在这种焊炬中,乙炔的流动主要靠氧气的射吸作用,因此不论使用低压乙炔或中压乙炔,都能保证焊炬的正常工作。

等压式焊炬中,乙炔与氧气的压力相等或接近相等。乙炔依靠自身压力便能与氧混合,产生稳定的火焰。

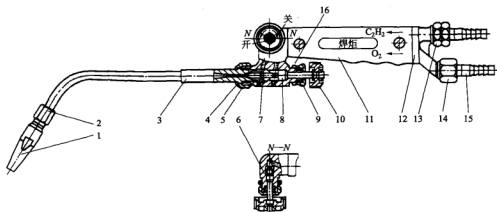


图 3.2 射吸式焊炬的结构

1—焊嘴；2—焊嘴接头；3—射吸管；4—射吸管螺母；5—中部主体；6—乙炔阀杆；7—喷嘴；8—氧气阀杆；9—密封螺母；10—氧气乙炔手柄；11—手柄；12—后部接件；13—乙炔螺母；14—氧气螺母；15—氧气乙炔接头；16—防松螺母

等压式焊炬结构简单，只要进入焊炬的气体压力不变，混合气体的成分也将不变，更好地保证了火焰的稳定。由于乙炔压力高，回火的可能性比射吸式焊炬小。图 3.3 示出等压式焊炬的结构。其规格和性能见表 3.2，等压式焊炬必须使用中压或高压乙炔。

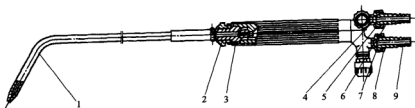


图 3.3 等压式焊炬的结构

1—焊嘴；2—混合管螺母；3—混合管接头；4—氧气接头螺母；5—氧气螺母；6—氧气软管接头；7—乙炔接头螺母；8—乙炔螺母；9—乙炔软管接头

表 3.2 等压式焊炬的规格和性能

焊炬型号	焊嘴号码	焊嘴孔径/mm	氧气工作压力/MPa	乙炔工作压力/MPa	焰心长度/mm≥	焊炬总长度/mm
H02-12	1	0.6	0.2	0.02	4	500
	2	1.0	0.25	0.03	11	
	3	1.4	0.3	0.04	13	
	4	1.8	0.35	0.05	17	
	5	2.2	0.4	0.06	20	
H02-20	1	0.6	0.2	0.02	4	600
	2	1.0	0.25	0.03	11	
	3	1.4	0.3	0.04	13	
	4	1.8	0.35	0.05	17	
	5	2.2	0.4	0.06	20	
	6	2.6	0.5	0.07	21	
	7	3.0	0.6	0.08	21	

焊炬在使用过程中,经常出现的故障是漏气以及焊嘴和气路被堵塞。当出现漏气和堵塞时,会使焊炬射吸能力降低,火焰不能正常调节甚至熄灭或接头处冒小火苗,严重时“叭叭”响。造成漏气的原因,主要是连接螺母松动、气阀密封垫损坏、阀杆与阀座配合不平。螺母松动主要出现于焊炬与焊嘴接头、射吸管与主体、气阀的密封螺母以及橡皮管接头等处。对此,只需将螺母拧紧即可。

喷嘴主要用于所需火焰的尺寸和轮廓调整,它能保证操作者有效将火焰引向焊件。喷嘴应根据焊炬尺寸、被加热工件尺寸和选择的燃气来确定。它们通常采用具有高导热性、不易过热的铜合金来加工。乙炔或氢气使用的喷嘴口是水平的,而用于丙烷或液化石油气的喷嘴,在喷嘴口上有一个凹面,以防止侧向风吹灭火焰。

② 气体存储设备 火焰钎焊用氧气常存储在氧气瓶中,它是储有气体氧的一种高压容器。从制氧设备中取得的氧气,在15MPa的压力下压入氧气瓶内,以便运输和保存。氧气瓶外部应涂有天蓝色油漆,用黑色油漆写上“氧气”两字以作标志。氧气瓶在使用过程中每隔3~5年应在充气工厂进行检验,即检查气瓶的容积、重量,查看气瓶的腐蚀和破裂程度。常用氧气瓶的尺寸和装气量见表3.3。

表3.3 常用氧气瓶的尺寸和装气量

外形尺寸/mm		内容积/L	瓶重/kg	瓶阀型号	装气量 (20℃、14.7MPa条件下)/m ³
外径	高度				
219	1150±20	33	47	QF-2 钢阀	5
	1250±20	36	53		5.5
	1370±20	40	57		6
	1480±20	44	60		6.5
	1570±20	47	63		7

由于氧气是一种助燃气体,性质极为活泼,在使用过程中,如不谨慎就有发生爆炸的危险,因此,在使用和运输氧气过程中,应特别注意以下几点。

a. 防油。禁止戴着沾有油渍的手套去接触氧气瓶及其附属设备;运输时,绝对不能和易燃物、油类放在一起。

b. 防震动。氧气瓶必须牢固放置,防止受到震动,引起氧气瓶爆炸。竖立时,应用铁箍或链条固定好;卧放时,应用垫木支撑防止滚动,瓶体上最好套上两个胶皮减震圈。运输时,应用专车进行运送。

c. 防高温。氧气瓶无论放置还是运输时,都应离开火源不少于10m,离开热源不少于1m。夏天,在室外阳光下工作,必须用帆布等遮盖好,以防爆炸。

d. 防冻。冬季使用氧气瓶时,如果氧气瓶开关冻结了,应用热水浸湿的抹布盖上使其解冻。绝对禁止用火去加热解冻,以免造成爆炸事故。

e. 开启氧气瓶开关前,检查压紧螺母是否拧紧。旋转手轮时,必须平稳,不能用力过猛,人应站在出氧口一侧。使用氧气时,不能把瓶内的氧气全部用完,至少留1~3个大气压的氧气。

f. 氧气瓶不使用时,必须将保护罩罩在瓶口上,以防损坏开关。

g. 修理氧气瓶开关时,应特别注意安全,防止氧气瓶爆炸。

乙炔瓶是用来存储和运输乙炔的焊接钢瓶。乙炔瓶内的最高乙炔压力是1.5MPa。由于乙炔是易燃、易爆的危险气体,所以在使用时必须慎重,除了遵守氧气瓶的使用要求外,还

应严格遵守以下几点。

a. 乙炔瓶不应遭受剧烈的震荡或撞击, 以免瓶内的多孔性填料下沉而形成空洞, 影响乙炔的存储。

b. 乙炔瓶在工作时应直立放置, 因卧放时会使得丙酮流出, 甚至会通过减压阀而流入乙炔橡皮管和焊炬内, 引起燃烧和爆炸。

c. 乙炔瓶体的表面温度不应超过 $30\sim 40^{\circ}\text{C}$, 因为乙炔温度过高会降低丙酮对乙炔的溶解度, 而使瓶内的乙炔压力急剧增高。

d. 乙炔减压阀与乙炔瓶的瓶阀连接必须可靠, 严禁在漏气的情况下使用, 否则会形成乙炔与空气的混合气体, 一旦触及明火就会造成爆炸事故。

e. 使用乙炔瓶时, 瓶内的乙炔气严禁全部用完, 根据气温必须保持一定的剩余压力, 并将气瓶阀关紧防止漏气。 $-5\sim 0^{\circ}\text{C}$ 时不低于 0.05MPa , $0\sim 15^{\circ}\text{C}$ 时不低于 0.098MPa , $15\sim 25^{\circ}\text{C}$ 时不低于 0.196MPa , $25\sim 35^{\circ}\text{C}$ 时不低于 0.294MPa 。

燃气可存储在单独的气瓶、带歧管的瓶组或管道中。单独的气瓶适用于气体用量不大或需要移动的场合。当消耗的气体量大时, 可以使用气瓶组。这些气瓶可以是便携式的, 也可以固定在一个地方, 用管路连接到工作站, 但都要使用安全装置。当需要大量气体时, 可采用管道输送, 气体输送管道必须由有资质的单位设计与施工。

③ 回火防止器 回火防止器是防止焊炬回火时逆燃火焰进入燃气源引起爆炸事故的一种安全装置。回火防止器按使用压力可分为低压和中压两种; 根据阻火介质分为干式和湿式(常称水封式)两种。目前国内常用的水封式回火防止器, 有低压开式和中压闭式两种类型; 常用的干式回火防止器主要有中压防爆膜式和中压冶金片式等类型。

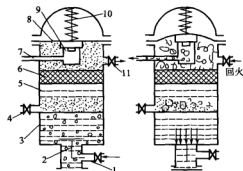


图 3.4 中压水封式回火防止器

1—进气管; 2—止回阀; 3—桶体; 4—水位;
5—分盘; 6—滤清器; 7—排气口; 8—弹簧
片; 9—排气活门; 10—弹簧; 11—出口阀

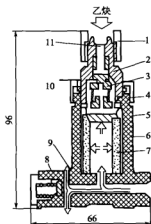


图 3.5 HF-1 型干式回火防止器结构

1—连接螺母; 2—回火防止器主体; 3—止回阀; 4—螺母;
5—压圈; 6—本体; 7—止火管; 8—安全阀;
9—安全阀泄气孔; 10—“O”形圈; 11—过滤网

图 3.4 是闭式中压水封式回火防止器的结构。其工作原理是, 正常工作时, 燃气由进气管 1 进入回火防止器, 靠燃气压力顶开止回阀 2, 气体通过水封和滤清器后从出口阀 11 导至气体胶管进入焊炬。当发生回火时, 燃烧气体使回火防止器内压力增加, 关闭止回阀 2, 同时顶开弹簧片 8, 燃烧气体经排气活门 9 由排气口 7 排出, 防止燃烧气体回流。

水封式回火防止器应垂直安放；每天检查，更换清水，确保水位准确；冬天使用时应加入少量食盐防冻，若发现水冻结，则只允许用热水或蒸汽解冻，严禁用明火加温解冻。

HF-1 型干式回火防止器结构见图 3.5。正常工作时，燃气由气瓶流出进入回火防止器。气体通过过滤网 11、止回阀 3、多微孔止火管 7 流入回火防止器内，然后排出体外进入焊枪。

当发生回火爆炸时，爆炸冲击波顶上回火止回阀 3，使燃烧的气体不能倒流，而使安全阀 8 动作，气流从泄气孔 9 排出，火焰在止火管内熄灭。火焰熄灭后，由于燃气瓶有压力，保证了燃气继续供气，而不必人工启动回火防止器。过滤网 11 可防止污物、异物进入回火防止器内。

干式回火防止器的主要技术参数见表 3.4。

表 3.4 干式回火防止器的主要技术参数

型 号		进气压力/kPa	输出压力/kPa	通气流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	外形尺寸/mm	质量/kg
HF 系列	HF-W1	—	10~150	0.3~4.5	$\phi 22 \times 116$	0.11
	HF-P1	10~150	9.8~147	0.4~6.0	$\phi 31.2 \times 93$	0.25
	HF-P2	10~150	9.8~147	0.4~6.0	$\phi 25.2 \times 73$	0.15
	HF-G1	10~150	<147	0.95~4.7	$\phi 42 \times 98$	0.43
XZ 系列	I	120	—	5	—	—
	II			3		
	III			6		
	IV			20		
	V			8		
	VI			80		
ZH-4 型		5	—	1	—	—
		10	—	1.2		
		20	—	2		
		30	—	2.5		
		40	30	1.4	$\phi 38 \times 112$	0.5
		50	30	2.5		
		60	30	4		
		80	40	5		
		100	55	6		
		120	70	7		
		150	85	9		

④ 减压器 减压器可将气体从高压降到工作需要的压力，并可以表示瓶内气体及减压后气体的压力。减压器的种类很多，火焰钎焊常用减压器的技术参数见表 3.5。减压器常见故障及防止措施见表 3.6。

氧气减压器在安全管理方面，应严格按照以下规定进行，以保证安全。

a. 严禁将氧气减压器用于其他气体指示，例如乙炔气、液化石油气及氢气等。不得任意拆卸、调换减压器内部零件。

表 3.5 火焰钎焊常用减压器的技术参数

减压器型号		QD1	QD-2A	QD-3A	DJ-6	SJ7-10
名称		单级氧气减压器				双级氧气减压器
压力表规格/MPa	高压表	0~24.5	0~24.5	0~24.5	0~24.5	0~24.5
	低压表	0~3.92	0~1.568	0~0.392	0~3.92	0~3.92
最高工作压力/MPa	进气侧	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7
	工作侧	2.45	0.98	0.196	1.96	1.96
工作压力调节范围/MPa		0.1~2.45	0.1~0.98	0.01~0.2	0.1~2.0	0.1~1.96
最大供气能力/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$		80	40	12	180	—
出气口径/mm		6	5	3	—	5
安全阀泄气压力/MPa		2.8~3.8	1.1~1.6	—	2.16	2.16
质量/kg		4	2	2	2	3
外形尺寸/mm		200×200×210	165×170×160	165×170×160	170×200×142	200×170×220

表 3.6 减压器常见故障及防止措施

常见故障	故障部位及原因	防止措施及修理
减压器漏气	减压器连接部分漏气,螺纹配合松动或垫圈损坏	拧紧螺钉;更新垫圈或加石棉绳
	安全阀漏气;活门垫料损坏或弹簧变形	调整弹簧;更换新活门垫料(青钢纸和石棉绳)
	减压器上盖薄膜损坏或拧不紧,造成漏气	更换橡胶薄膜或拧紧螺钉
减压表针爬高(自流),调节螺钉松开后,气体流出(低压表针继续上升)	活门或门座上有污物,活门密封垫或活门座不平;回动弹簧损坏,压紧力不足	将活门污物去净,将活门不平处用细纱布磨平,如有裂纹,更换新的,调整弹簧长度
氧气瓶阀打开时,高压表表针指示有气,但低压表不动作或动作不灵敏	调节螺钉已拧到底,但工作压力不升或升得很少,其原因是主弹簧损坏或传动杆弯曲	拆开减压器盖,更换主弹簧和传动杆
	工作时氧气压力下降,或表针有剧烈跳动,原因为减压器内部冻结	用热水加热解冻后,把水分吹干
	低压表已指示工作压力,但使用时突然下降,原因是氧气瓶阀门没有完全打开	进一步打开氧气阀门

b. 减压器冻结时,要用清洁温水和蒸汽加热解冻,切忌用火或红铁烘烤。不得与带有油脂零件一同存放,长期不用时,切忌用油脂类涂料封存。

c. 使用新氧气减压器时,应按说明书的使用要求正确操作。减压器上的压力表必须定期检验,以保证压力表的精确性。

⑤ 其他辅助装置

a. 橡胶管及快速接头。气瓶或管道中的气体必须采用橡胶管输送到焊炬中,通常氧气胶管内径为 8mm,常用燃气乙炔胶管用内径 10mm。输送氧、乙炔用橡胶管的规格见表 3.7。胶管快速接头以接插方式接上、卸下氧气和乙炔胶管,可以节省以往用螺母拧紧的时间。JYJ 型氧气胶管快速接头的结构简图见图 3.6。JRJ 型乙炔胶管快速接头的结构简图见图 3.7。

氧气胶管快速接头外表锁紧套圈处绕有天蓝色塑料包布,或者六角螺母中间不开槽,与焊炬氧气进口处螺母一致。乙炔胶管快速接头外表锁紧套圈处绕有红色塑料包布,或者六角螺母中间开有 60°倒角的凹槽,与焊炬乙炔进口处的连接螺母一致。

表 3.7 输送氧、乙炔用橡胶管的规格

名称	内径/mm		胶层厚度/mm<		工作压力/MPa	长度及允许公差
	公称尺寸	容许公差±	内胶层	外胶层		
氧气胶管	6	0.3	1.5	1.2	1.5	用户提出,经供方同意后确定长度允许公差为全长的±1%
	8	0.5				
	10	0.5				
	13	0.8				
乙炔胶管	6	0.3	1.5	1.2	1.3	用户提出,经供方同意后确定长度允许公差为全长的±1%
	8	0.5				
	10	0.5				

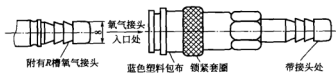


图 3.6 JYJ 型氧气胶管快速接头的结构简图

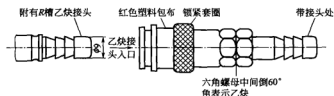


图 3.7 JRJ 型乙炔胶管快速接头的结构简图

b. 夹具。火焰钎焊用夹具的设计主要考虑夹具不能干涉焊炬火焰的正常移动和钎焊结合面的均匀加热。钎焊操作者需要良好的视野观察接头情况。夹具与组件的接触面积越小越好，它不能被焊炬火焰退火、不能接触钎剂、不能影响热量的流失。火焰钎焊应能适应钎焊组件加热后的膨胀要求。

(2) 自动火焰钎焊机

自动火焰钎焊机是采用数字程序控制系统使火焰钎焊过程全部（或部分）自动进行的设备。自动火焰钎焊机常用于大批量生产特定产品。选择自动化火焰钎焊设备必须考虑焊件的尺寸和结构、钎焊接头形式、钎焊生产效率、焊件的组装、钎料及钎剂的预置、加热方式等因素。

常用的自动火焰钎焊机有转盘式和直线式两种，转盘式自动火焰钎焊机一般为多工位的，如 6 工位、8 工位、12 工位等。用于自动火焰钎焊机的焊炬一般都为专用的多喷嘴焊炬。图 3.8 是以液化石油气为燃料、空气助燃的钎焊自行车车架前、中、后三个接头用焊炬的结构。表 3.8 列出国内部分自动火焰钎焊机及其应用。

图 3.9 是空调压缩机壳体与三管（排气管、吸气管和工艺管）火焰钎焊专用 12 工位转盘式钎焊机。它是由分度装置、加热机构、送料机构、冷却系统及自动控制系统等几部分组成。该钎焊机采用 6 套加热机构同时对 3 根管进行预热和钎焊加热。为了保证加热均匀，加热机构装有两把射吸式焊炬和摆动机构。焊炬的位置即加热点以及加热火焰的状态均可任意

调节。摆动机构带动两把焊炬进行前后摆动。两把焊炬和摆动机构可整体快速进退。

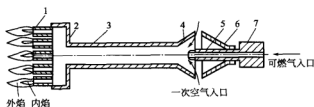


图 3.8 多喷嘴焊炬结构

1—燃烧孔；2—燃烧器；3—引射器的混合室；4—引射器的吸气室；5—喷嘴；6—风挡；7—进气管

表 3.8 自动火焰钎焊机及其应用

名 称	燃气	应 用
12 工位转盘式自动火焰钎焊机	丙烷	空调器压缩外壳与排气管、吸气管、工艺管钎焊
EQB-L 系列直线式数控自动火焰钎焊机	丙烷	空调蒸发器及冷凝器、自行车、医疗器械等管钎焊
EQB-R 系列转盘式数控自动火焰钎焊机	丙烷	仪表开关、各种控制阀门、管零件、消声器、储液罐等
多头自动火焰钎焊机	丙烷	铜视镜的纯铜管与黄铜视镜体的钎焊
QH-A 自动火焰钎焊机	丙烷	空调器四通阀的先导阀上的毛细管 D、S 分别与主阀上的 D、S 接管的钎焊
T6-1×1 的 6 工位转盘式自动火焰钎焊机	丙烷	空调器四通阀的冷暖换向阀阀体与 S、E、C、D 管及管支架钎焊
转向阀自动火焰钎焊机	乙炔	热泵型空调器 DHF 电磁换向阀主阀阀体钎焊
8 工位消声器转盘式自动火焰钎焊机	乙炔	压缩机消声器与排气管管钎焊
6 工位自动火焰钎焊机	丙烷	空调器储液器罐体与铜管钎焊
氧丙烷多嘴火焰自动钎焊机	丙烷	自行车车架、钢制散热器
C-450B 型电脑编程全自动火焰钎焊机	液化石油气	空调器热交换器主回路管与 U 形弯管钎焊
电热管自动火焰钎焊机	乙炔	电热管、纯铜管与黄铜管板钎焊

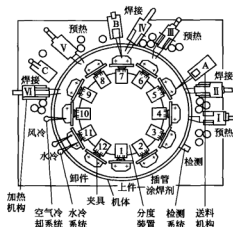


图 3.9 12 工位转盘式自动火焰钎焊机

分度装置是该钎焊机的关键部件,由工件夹具、转盘、分度机构、减速器及驱动电动机组成。12个工件夹具沿转盘圆周均布,夹具可方便地装卸壳体,并保证了壳体与管子的定位精度。夹具与转盘一起装在分度机构上。分度机构将减速后的连续转动变为间歇运动,实现12工位的分度和定位。

送料机构安装在焊接工位上,并与加热机构相配合。为实现钎料的自动送给,该钎焊机选用直径为1.2~1.4mm的盘状钎料,采用气动送料方式,完成钎料的分段送进,送进长度和速度均可无级调节。

该钎焊机的气路分为压缩空气、燃气和氧气三路。压缩空气经滤水、减压后进汇流板,再由汇流板分配给电磁阀,控制各加热与送料机构的快速进退及钎料的压紧送给等动作。燃气回路除总进口减压阀具有防止回火功能外,在每把焊炬的进气端还串联有回火防止器,以确保安全。

3.2 火焰钎焊用气体及钎料

3.2.1 火焰钎焊用气体

火焰钎焊用气体主要包括氧气和燃气,其中燃气有乙炔、天然气、丙烷、液化石油气、丙烯等。这些燃气与纯氧和空气混合都可以燃烧,相对空气而言,氧-燃气混合燃烧可以获得较高的热量。火焰钎焊常用燃气的特点见表3.9。

表 3.9 火焰钎焊常用燃气的特点

气 体		乙炔(C ₂ H ₂)	丙烷(C ₃ H ₈)	丙烯(C ₃ H ₆)	天然气(CH ₄)	氢(H ₂)
密度(标准状态下)/kg·m ⁻³		1.17	1.85	1.82	0.71	0.08
15.6℃时相对于空气质量比(空气=1)		0.906	1.52	1.48	0.55	0.07
着火点/℃		335	510	455	645	510
比热值/kJ·m ⁻³		52963	85746	81182	37681	10048
理论需氧量(氧-燃气体积比)		2.5	5	4.5	2.0	0.5
实际耗氧量(氧-燃气体积比)		1.1	3.5	2.6	1.5	0.25
火焰温度(中性焰)/℃		3100	2520	2870	2540	2660
爆炸范围(可燃气体体积分数)/%	空气中	2.5~80	2.5~10	2.4~10	5.3~14	4.1~74
	氧气中	2.8~93	2.3~55	2.1~53	5.5~62	4.0~96

手工火焰钎焊常采用氧气和丙烷、氧气和乙炔混合。制冷行业常采用氧气和液化石油气,需要提高钎焊速度、加工质量大的工件时,可以设计大热负荷的喷嘴或选择大号焊炬。在选用可燃性气体时应考虑以下因素。

- ① 发热量要大,也就是单位体积可燃气体完全燃烧放出的热量要大。
- ② 火焰温度要高,一般是指在氧气中燃烧的火焰最高温度要高。
- ③ 可燃气体燃烧时所需要的氧量要少,以提高其经济性。
- ④ 爆炸极限范围要小。
- ⑤ 运输相对方便。

(1) 氧气

氧气在常温常压下是一种无色、无臭、无味、无毒的气体。在0℃和1个大气压下氧气密度为1.43kg/m³,比空气大。氧的液化温度为-182.96℃,液态氧呈浅蓝色。常温时,氧

则以化合物和游离态大量存在于空气和水中。氧气本身并不能燃烧，但它是一种化学性质极为活泼的助燃气体，能与很多元素化合，生成氧化物。

氧气的制取方法很多，如化学法、电解水法及液化空气法等。但在工业上大量制取氧气时，都采用液化空气法。就是将空气压缩，并且冷却到 -196°C 以下，使空气变成液体，然后再升高温度，当液体空气的温度上升到 -196°C 时，空气中的氮则蒸发变成气体，但温度继续升高到 -183°C 时，氧开始汽化。再用压缩机将气体氧压缩到120~150个大气压，装入专用的氧气瓶中，以便使用和储存。

(2) 乙炔

乙炔是未饱和的碳氢化合物(C_2H_2)，在常温和1个大气压下是无色气体。一般情况下焊接用乙炔，因含有 H_2S 及 PH_3 等杂质而有一种特殊的气味。

乙炔在纯氧中燃烧的火焰，温度可达 3150°C 左右，热量比较集中，是目前在焊接和切割中应用最为广泛的一种可燃性气体。

乙炔密度为 1.17kg/m^3 。乙炔的沸点为 -82.4°C ，温度在 -83.6°C 时成为液体，温度低于 -85°C 时成为固体。气体乙炔可溶于水、丙酮等液体中。在 15°C 和1个大气压下，1L丙酮中能溶解23L乙炔，压力增大时，乙炔在丙酮中的溶解度也增大。当压力增加到1.42MPa时，1L丙酮中能溶解约400L乙炔。

由于乙炔受压时容易引起爆炸，因此不能用加压直接装瓶来储存。工业上通常利用其在丙酮中溶解度大的特性，将乙炔灌装在盛有丙酮或多孔物质的容器中，通常称为溶解乙炔或瓶装乙炔。

乙炔瓶体通常被漆成白色，并漆有“乙炔”红色字样。瓶内装有浸满丙酮的多孔性填料，可使乙炔以1.5MPa的压力安全地储存在瓶内。使用时，必须使用乙炔减压器将乙炔压力降低到低于0.103MPa方可使用。多孔性填料通常用质轻而多孔的活性炭、木屑、浮石和硅藻土等合制而成。

焊接时，一般要求乙炔的纯度大于98%，规定的灌装条件是：温度 15°C 时，充装压力不得大于1.55MPa。瓶装乙炔由于具有安全、方便、经济等优点，是目前大力推广应用的—种乙炔供给方法。

(3) 液化石油气

液化石油气是石油工业的一种副产品，主要成分为丙烷(C_3H_8)、丁烷(C_4H_{10})、丙烯(C_3H_6)、丁烯(C_4H_8)和少量的乙炔(C_2H_2)、乙烯(C_2H_4)、戊烷(C_5H_{12})等碳氢化合物的混合物。液化石油气在普通温度和大气压下，组成液化石油气的这些碳氢化合物以气态存在。但只要加上0.8~1.5MPa的压力就会变为液体，以便于瓶装储存和运输。

工业上一般使用气态的石油气。气态时是一种略带臭味的无色气体，在标准状态下，石油气比空气重，其密度为 $1.8\sim 2.5\text{kg/m}^3$ 。液化石油气的几种主要成分均能与空气或氧气构成具有爆炸性的混合气体，但爆炸混合比值范围较小，与使用乙炔气相比价格便宜，比较安全，不会发生回火。液化石油气完全燃烧所需氧气量比乙炔大，火焰温度较乙炔低，燃烧速度也较慢，故液化石油气的焊炬也应做相应的改制。

根据用户用量及使用方式，钢瓶容量也有所不同。工业上常采用30kg容量钢瓶，如果单位液化石油气用量较大，还可制造1.5t和3.5t的大型储气罐。钢瓶的制造材料可采用16Mn钢、Q235钢或20优质碳素钢等。钢瓶最大工作压力为1.6MPa，水压试验为3MPa。液化石油气钢瓶外表涂银灰色，并标明“液化石油气”字样。

(4) 其他可燃气体

天然气是一种主要由甲烷组成的气态化石燃料。它主要存在于油田和天然气田，也有少

量出于煤层。天然气燃烧后无废渣、废水产生,有使用安全、热值高、洁净等优势。天然气广泛用于机械化火焰钎焊中。

丙烷通常为气态,但一般经过压缩成液态后运输。丙烷是处理天然气或精炼原油得到的副产物。在处理天然气的过程中,必须将丁烷、丙烷和大量的乙烷从原气中去除,否则这些挥发物会在天然气管道中发生缩合。与天然气不同的是,丙烷比空气重(大约为空气的1.5倍),在自然状态下,丙烷会下落并积聚在地表附近。在常压下,液态的丙烷会很快变为蒸汽并且由于空气中水的凝结而显白色。火焰钎焊时,丙烷可以在充足氧气中燃烧,生成水和二氧化碳。

机械自动化火焰钎焊可以使用管道输送的压缩空气和天然气,尽管火焰温度较低,但机械化火焰钎焊是逐步加热的,最终温度仍可以满足钎焊要求。

3.2.2 钎料及钎剂

(1) 钎料

大多数金属适合于火焰钎焊,只有一些活泼的金属,例如钛和锆,因为没有配套使用的钎剂而不推荐使用火焰钎焊。不锈钢可以用火焰钎焊,但推荐使用在稳定级(例如1Cr18Ni9Ti、1Cr18Ni11Nb)和超低碳的18-8不锈钢或超低碳的Cr-Ni-Mo奥氏体不锈钢,超低碳不锈钢钎焊接头的使用减小了晶间腐蚀的敏感性。

火焰钎焊用钎料有BAg、BCuP和RBCuZn等。BAg钎料的熔点一般在593~815℃,RBCuZn钎料的熔点在815~982℃。在设计组件和工艺时应该考虑钎料的流动特点。BCuP钎料在704~926℃的范围内钎焊铜及铜合金时有明显的优势。

BAg钎料由于钎焊温度低,所以可用于较高的生产速度中,并且具有较好的钎焊操作性。因此,BAg钎料较高的成本可以被自动化、低能耗、高效率以及便于培训操作者等因素来弥补。BAg钎料具有优良的钎焊工艺性能,适合于在接头上预置或手工送进,主要用于钎焊大多数黑色金属和有色金属,钎焊时需配以钎剂。

BCuP钎料主要用于钎焊铜及铜合金,在银、钨和钼钎焊应用中有所限制,因为BCuP钎料能形成脆性的金属间化合物。BCuP钎料不能用于黑色金属和镍基合金或含有10%以上镍的铜合金的火焰钎焊。采用BCuP钎料钎焊纯铜时是自焊剂,但钎焊其他金属(包括铜合金)时,要使用钎剂。由于BCuP钎料接头耐蚀性较低,因此不能用于含硫的工作环境。BCuP钎料可以呈丝状、颗粒、预成形和膏状使用;BCu80AgP钎料可以呈带状、垫片或预冲压成形状使用。

RBCuZn钎料被用于连接各种黑色金属和有色金属,具有明显高于BAg和BCuP的钎焊温度。但钎焊时要防止母材过热,因为工作温度偏高可能会发生锌蒸发,从而提高熔融钎料金属的熔点,产生空穴,削弱接头,甚至引起泄漏。

(2) 钎剂

火焰钎焊用的钎剂为硬钎剂。在使用铜锌钎料时,常用的硬钎剂以硼砂为主;银钎剂由硼化物和氟化物组成,配合银钎料主要用于钎焊铜及其合金、钢和不锈钢等。由于钎焊不锈钢和耐热钢时,表面有难以去除的钛、铬等氧化物薄膜,因而在钎剂中必须加入具有去膜能力更强的氟化物和硼化物。火焰钎焊常用的钎剂性能和用途见表3.10。

表 3.10 火焰钎焊常用的钎剂性能和用途

钎剂牌号	基本性能	主要用途
QJ101(银钎剂)	熔点约500℃,吸潮性强,能有效地清除各种金属氧化物,提高钎料的流动性	在550~850℃范围内钎焊各种铜及其合金、钢及不锈钢等

续表

钎剂牌号	基本性能	主要用途
QJ102 (银钎剂)	熔点约 550℃, 极易吸潮, 能有效地清除各种金属氧化物, 提高钎料的流动性, 活性很强	在 600~850℃ 范围内钎焊各种铜及其合金、钢及不锈钢等
QJ103(特制银钎剂)	熔点约 530℃, 吸潮性极强, 能有效地清除各种金属氧化物, 提高钎料的流动性	在 550~750℃ 范围内钎焊各种铜及其合金、钢及不锈钢等
QJ104(银钎剂)	熔点约 600℃, 吸潮性极强, 能有效地清除各种金属氧化物, 提高钎料的流动性	在 650~850℃ 范围内钎焊各种铜及其合金、钢及不锈钢等
QJ105(低温银钎剂)	熔点约 350℃, 吸潮性极强, 能有效地清除氧化铜和氧化亚铜, 提高钎料在铜合金上的流动性	在 450~600℃ 范围内钎焊铜及其合金等

3.3 火焰钎焊工艺

3.3.1 接头设计及表面处理

(1) 接头设计

火焰钎焊所要求的接头, 除了要遵循钎焊接头的设计原理外, 在火焰钎焊接头设计中还需要考虑焊炬要容易接近局部加热的接头面、要使用焊剂 (除了铜-铝接头用含磷钎料外) 以及充分了解所用钎料的成分。

火焰钎焊允许在特定的局部位位置集中加热, 这在手工火焰钎焊中特别容易实现。组件中具有不同的截面和质量的构件中, 火焰指向大件加热以避免小件过热, 使用不同热胀系数材料加工的接头, 应根据特定的需求确定热量集中在高膨胀还是低膨胀的材料一侧, 以保证在焊接温度下维持毛细吸附现象。接头设计还要充分利用火焰加热的灵活特点。

火焰钎焊用钎料中包含熔点抑制剂, 例如锌、镉、磷或锡等; 钎剂是在钎焊温度下具有高液态黏性的盐。这些钎料和钎剂在钎焊温度下要求的间隙是 0.025~0.125mm, 以适应毛细流动。当从正面送进钎料时, 建议钎料从温度最低处送进, 流向接头温度最高处。考虑这些特点, 钎料形式和布置应设计成适合毛细流动, 即使钎料朝向温度较高的接头面流动。

(2) 表面处理

毛细作用只有在金属表面相当清洁时才能很好地起作用, 因此, 焊前必须去除焊件表面的所有油污、铁锈和氧化物, 清洁焊件的方法如下。

① 在清除污垢、铁锈和氧化物之前, 将钎焊件浸入化学清洗液中去除表面的脏物、油和油脂。

② 用砂纸打磨彻底清理, 然后用干净棉布或海绵去除残余物或渣粒。

③ 钎焊件清洗完毕之后, 钎焊前应使之完全干燥, 干燥后, 应尽可能快地进行施焊, 以免再度污染。

3.3.2 钎焊火焰的控制

(1) 氧-乙炔火焰的分类和性质

氧-乙炔火焰是乙炔和氧经焊炬混合, 由喷嘴喷出后混合燃烧、并发生一系列化学反应所形成的火焰。根据氧和乙炔混合比的不同, 氧-乙炔火焰可分为中性焰、碳化焰 (也称还原焰) 和氧化焰三种, 其构造和形状如图 3.10 所示。

① 中性焰 在焊炬的混合室内, 氧与乙炔的体积比 (O_2/C_2H_2) 为 1~1.1 时, 被完全燃烧, 无过剩的游离碳或氧, 这种火焰称为中性焰。中性焰由焰心、内焰 (微微可见) 和外

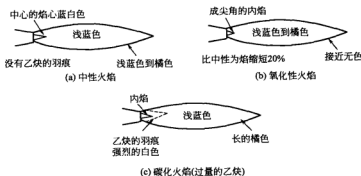


图 3.10 氧-乙炔火焰的构造

焰三部分组成。焰心呈锥形，白色而明亮，轮廓清楚 [图 3.10(a)]。其长度与混合气的流出速度有关，流速快，焰心就长，反之就短。在焰心中发生两种化学反应：

一部分乙炔与氧气化合生成一氧化碳和氢



一部分乙炔受热分解成碳和氢



而总的反应式为



焰心的光亮就是由炽热的碳微粒发出的。亮度虽然高，但温度并不很高，约有 950°C 。火焰紧靠焰心末端，呈杏核形，蓝白色，并带深蓝色线条，微微闪动。焰心中分解出的碳就在这一区域内与氧化合而剧烈燃烧，并生成一氧化碳，因此温度很高，其中离开焰心末端 3mm 左右处温度最高，约 3100°C 。这部分气氛中 $2/3$ 是一氧化碳， $1/3$ 是氢，所以具有一定的还原氧化物的作用。

外焰与内焰并无明显界限，一般是从颜色上区别。外焰的颜色从内向外由蓝白色变为浅蓝色和橘色。在外焰中，主要是一氧化碳、氢气与空气中的氧化合而充分燃烧，生成二氧化碳和水蒸气。其化学反应式为：



外焰的温度比焰心高，为 $1200 \sim 2500^\circ\text{C}$ ，具有氧化性，二氧化碳对熔池具有保护作用。中性焰的温度沿火焰的轴线而变化，见图 3.11。内焰区沿火焰轴线的最高温度是在距焰心 $2 \sim 4\text{mm}$ 的范围内，火焰温度为 $3050 \sim 3100^\circ\text{C}$ 。离此处越远，火焰温度越低。图 3.11 所示温度为焊嘴孔径 1.9mm 时的实测值。

② 氧化焰 氧与乙炔的混合比 ($\text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_2$) 大于 1.1 (一般在 $1.2 \sim 1.7$ 之间) 时，混合气燃烧过程加剧，并出现氧过剩，这种火焰称为氧化焰。氧化焰中整个火焰和焰心的长度都明显缩短，只能看见焰心和外焰部分 [图 3.10(b)]。火焰挺直，带有“嘶嘶”的声音。氧的比例越大，火焰则越短，响声也越大。氧化焰的最高温度高于中性焰。由于存在过剩的游离氧，故具有氧化性。

③ 碳化焰 氧与乙炔的混合比 ($\text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_2$) 小于 1 (一般在 $0.85 \sim 0.95$ 之间) 时，混

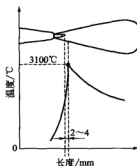


图 3.11 中性焰的温度分布

合气中的乙炔未完全燃烧,这种火焰称为碳化焰。碳化焰的焰心、内焰和外焰三部分均很明显 [图 3.10(c)]。整个火焰长而软,焰心呈灰白色,也发生乙炔的氧化和分解反应;内焰由一氧化碳、氢和碳微粒组成;外焰呈橘色,除燃烧产物二氧化碳和水蒸气外,还有未燃烧的碳和氢。碳化焰的最高温度低于 3000℃。

(2) 各种火焰的获得

改变氧与乙炔的混合比值,可获得不同温度和性能的火焰。为获得理想的钎焊质量,必须根据不同的材料来正确地调节和选用火焰。打开焊炬的乙炔阀门点火后,慢慢地开放氧气阀增加氧气,火焰即由橙黄色逐渐变为蓝白色,直到焰心、内焰和外焰的轮廓清晰地呈现出来,这时的火焰即为碳化焰。

在碳化焰的基础上继续增加氧气,当内焰基本上看不清时,得到的便是中性焰。如发现调节好的中性焰的能率过大、需调小时,先减少氧气量,然后将乙炔量调小,直至获得所需要的火焰为止。另外,在焊接过程中由于各种原因,火焰的状态有时会发生变化,要及时注意调整,使之始终保持中性焰。

在中性焰的基础上再增加氧气量,焰心变得尖而短,外焰也同时缩短,并伴有“嘶嘶”声,即为氧化焰。

火焰钎焊一般要求使用稍微还原的火焰。但在钎焊铜时要注意考察铜的生产方式和牌号,对紫铜中的含氧铜如 T1、T2 等,而应用稍微氧化的火焰,以防止加热过程中铜的破裂,这是因为纯铜中的氧和还原火焰中的气体的反应能导致金属内部氧化物还原,在金属内部产生蒸汽,形成小气阱,高温下蒸汽膨胀使得母材断裂。

调节氧-乙炔火焰可根据观察火焰的特点来维持。然而,丙烷气和液化石油气的火焰调节起来比较困难,因为在火焰中没有明显的变化发生,此时,火焰的调节可以通过流量计来实现。

火焰钎焊时,要用内焰而不是焰心来加热钎焊件。在氧-燃气焊接中,密集的热量被集中在将要焊接的特定面积上,这对熔化母材是需要的。而在氧-燃气钎焊中,只需要钎料熔化、不需要母材熔化,并且钎料只在母材的钎焊区域达到适合的钎焊温度时才能实现流动和毛细现象,要通过工件和火焰的相对运动,使接头区域达到均匀的温升,而且加热位置影响钎焊质量。因此,要根据金属的大小、形状和热导率来预热接头区域的面积。

正确的火焰加热是偏向高导热性的接头组件,并且避免在热冲击中的应力开裂。钎焊的接头区域是否能在同一时间达到钎焊温度是最重要的,加热时如果能同时将接头各部加热到所需的钎焊温度,将有利于使钎料填满接头,并获得优质接头。正确的加热是偏向高导热性的接头组件,如厚重件和传热快的工件。尽量不要把火焰直接作用在钎料上以及缝隙处的钎制上,直接加热钎焊材料容易使它们过热、出现烟气,甚至导致钎焊材料失效。不合适的加热,主要是由于不正确的操作,能够引起裂纹、过量的钎料和母材的相互作用或者母材和钎料的氧化。

3.3.3 火焰钎焊操作要点

(1) 钎料、钎剂的添加

手工火焰钎焊操作中通常采用送进式添加钎焊材料,然而,在更高的产量时需要机械化操作,合理的接头设计可以使用预制的钎料或焊膏。放置预制钎料要避免过早地熔化。焊膏要以火焰的力量不能把它从组件中吹开的方式应用。

钎焊应该在空气流动很小的环境中完成,要避免能够导致工件温度不均匀的有风环境。加入钎料后,钎料将朝接头面中最热的方向流动,因此,在钎焊温度下,要控制热量牵引钎料沿着预期的方向通过接头。

当手工将钎料丝送到接头上时,先将焊丝头浸在钎剂中,然后用钎料粘钎剂添加到接头上,工件加热过程可以完成这个动作,甚至在添加钎料以后,如果有阻碍钎料流动的现象,也可以通过增加钎剂的办法来弥补,控制热量使熔化的钎料贯穿接头流动。当使用送丝方式钎焊小而薄的部件,钎焊温度要高于钎料的液相线温度,以补偿焊丝接触到工件时引起的接头冷却。多加钎剂有利于对钎缝的清洗和焊后的清渣,尤其在清渣不太方便的场合,这是一个有效的补救方法。

加热循环开始时,应仔细操作以避免火焰将钎剂从组件上吹离。当使用改进的钎剂时,通过熔化钎剂黑暗的状态来观察表面是困难的。要求操作者不能刮掉这些钎剂以改善对接头的观察,因为这将导致接头面的氧化以及钎料在接头表面流动不充分。

当使用钎剂时,利用钎剂的熔点比钎料的钎焊温度稍低的特性来避免工件过热。一般情况下,钎剂的活性温度是从低于钎料的固相线温度到恰好高于钎料的钎焊温度的一个设定的温度范围。钎料受热后从粉状(膏状)变成干扁状,继续升温则熔化变成透明的液体,进入活性范围,因此利用钎剂的熔点可以用来指导操作者观察工件是否接近钎焊温度。

钎剂一旦完全变成液体后,就将钎料接触到接头上,钎料瞬间熔化,连续送进钎料,直到流动的钎料填满接头,然后停止加热。这种技术能让熔融钎剂充当温度的向导,并且用组件上的热量引起钎料的熔化和流动。

通过加热靠近钎焊材料的母材,再由母材通过热传导将热量传递给钎焊材料,同样可以快速完成对钎剂和钎料的加热,实现高效优质连接。当没有向母材提供充分的热量时,将出现“冷接头”,具有凹凸不平的接缝外观,钎料甚至呈现小球状。

(2) 焊炬的摆动

钎焊时要保持一个均匀的温度,尤其是在结合面上的温度要均匀一致地达到钎焊温度,尽可能地在钎焊温度下维持一段时间,以完成钎料向接头缝隙的流入和气体的析出。为了完成这个目标,焊炬要不停地摆动。

也可以使用辅助多头或多火焰焊炬实现工件温度的均匀化。在机械化操作中,部件通过加热区域时摆动和旋转,或者换成火焰围绕着工件移动。在一些操作中布置的焊炬或燃烧可以加热整个工件接头面积,总之,其目的是使两个金属在接头的结合面上维持均匀的钎焊温度。

(3) 钎焊接头的冷却

在完成任何钎焊操作后,必须使接头在静止状态下冷却到钎料的固相线温度以下,这种静态空冷必须在没有振动和移动的条件下完成,以防损害接头。一旦接头固化,可以浸在水中、喷淋或者使用强冷空气冷却。

允许的冷却速度取决于母材的热胀系数和接头能够承受的热冲击,例如,硬质合金钎焊接头必须在静止空气中冷却以防止开裂。如果工业用的淬火水中含有清洗钎剂和溶解焊垢的化合物,将有助于对钎焊后工件的清洗。

3.3.4 管路构件的火焰钎焊

采用钎焊方法连接管路是经济的加工方法,设备和材料能容易被熟练工人操作,钎焊连接已经方便地用于铝合金、铜合金、钢、不锈钢和其他大多数金属,大多数小直径管路既能被软钎焊、也能被硬钎焊,与其他焊接相比,钎焊具有劳动效率高、致密性好、操作简单等优点,其中火焰钎焊是最常用的管路钎焊方法之一。

(1) 钎焊管口的制备及清洗

管子应该切割成直角,以便平整地放置在插接管下部的凸扁上。钢锯和砂轮机适合切割大直径管材。小尺寸管,例如 $\phi 10\text{mm}$ 左右的精密卷焊钢管,建议使用小的滚刀切割。在任

何切割操作中, 夹持压力不应该引起管壁变形。要保证管口圆度和精度。

插入管与(承接端)套管之间的单面间隙, 一般在 0.1mm。搭接处, 插入管与套管配合面上的直径差为 0.15~0.23mm。使用这种间隙的钎焊工艺合适, 受热后的内管会膨胀并贴近套管, 使结合面上的温度均匀一致, 从而产生牢固的钎焊接头。间隙大于 0.3mm 或太紧将增加接头不连续的可能性。

在切割之后, 管路应该较孔以清除毛刺或不规则的边缘, 这些毛刺将影响钎料的流动或部件的装配间隙。半圆锉或类似形状的其他工具也可以用来清除这些表面毛刺和异物, 要仔细操作以防止由于管口过度铰削引起的变形或增加接头间隙。

大多数钎料和钎剂可用于管路的火焰钎焊, 选择与管路配套使用的钎料主要依据管路的材质。当接头间隙不能控制在高精度公差时, 可以选择熔点范围宽的钎料, 以降低管口的加工难度。足够的流动性使得钎料在良好的湿润性的作用下流到毛细空间中。

在大多数管子的钎焊接头中, 从保证接头的强度达到母材强度的角度讲, 管子的插接深度是壁厚的 3 倍就可以保证。但管径小于 $\phi 5\text{mm}$ 时, 如果只是按照管子的壁厚来设计插接深度, 往往会引起管子内部在钎焊过程中被钎料堵塞, 因此小直径管要适当加大插管深度, 例如, 插入管内径为 $\phi 0.6\text{mm}$ 时, 插管深度为 30mm; 插入管内径为 $\phi 3.0\text{mm}$ 时, 插管深度为 10mm; 插入管内径为 $\phi 3.3\text{mm}$ 时, 插管深度为 11mm。

插入管的末端质量以及与其配套的套管的内表面必须彻底清理, 以便使钎料在结合面上良好地润湿和流动。母材上的污垢、油脂、残留的油漆和氧化物都必须清除。使用有机溶剂脱脂通常可以洗去各种油。然而, 这些溶剂通常不能清除氧化物和为了防止进一步氧化而涂抹的有机涂层。清洗应保证清理掉污物, 而不影响母材。采用轻轻地磨削管口和插口是最好的方法, 应使用合适的线状物、细颗粒的砂纸或砂布。在机械清理之后, 应避免埋在管口连接面上的颗粒。

有时可以采用无机酸或碱性的除垢剂来清理管件的钎焊表面, 在连接之前对镍、铝合金、不锈钢和铸铁管件, 常采用活性较强的化学清洗剂, 然后对化学清洗后的部件进行彻底的冲洗。

(2) 钎剂和助熔剂的使用

除了使用铜磷钎料钎焊铜管, 或在控制气氛和真空条件以外, 钎焊所有的管路都需要使用钎剂, BCuP 钎料的磷在钎焊铜时起到自钎剂的作用, 然而, 在钎焊其他铜合金时仍然推荐使用钎剂。当铜管被连接到其他异种铜合金上时必须使用钎剂。

使用钎剂的目的之一是防止接头表面在清洗之后和钎焊过程中的氧化。钎剂不能像清洗用化学剂那样去清除厚重的氧化膜, 但能成功应用于清理在清洗之后生成的薄氧化膜。另外钎剂可以溶解或吸收任何操作过程中在接头表面形成的金属氧化物。

在清洗之后立即将钎剂用小的毛刷或干净的布涂刷到将要连接的表面上, 然后立即钎焊。钎剂涂刷之后, 等候钎焊的时间不要超过 1h, 并尽量缩短时间间隔。

钎焊管路的钎剂最好采用钎料制造者推荐的专用钎剂。大批量生产时, 母材和钎焊材料相对固定, 不但要考虑钎剂与钎料的相容性, 而且要追求钎料和钎剂的最佳匹配效果以及注意钎剂的吸潮性、残渣的腐蚀性等。

钎剂活性和稳定性取决于表面氧化物的种类和氧化程度、使用的加热方法和部件的加热温度。钎剂具有在钎焊温度下流动性好的特点; 延长加热或使钎剂过热将损害钎剂的效果。被钎料润湿的所有表面应全部被钎剂涂敷, 但应当避免在管路内表面应用钎剂。接头内部的夹杂通常可以靠在接头管头上预置钎料环来解决。加热时, 接头上的钎料将从外部流到接头中。

钎焊操作前,组件应被仔细定位和适当支撑,错误的定位因为改变了管路的间隙,从而影响连接质量。夹具和支撑机构通常允许工件在钎焊和运行过程中膨胀和收缩。环状、带状和钳形工具有助于维持接头的直线度。在组件被固定后,最好使用探针检测间隙。

(3) 钎焊的操作要求

通常是采用氧-燃气钎焊组件,常采用丙烷、乙炔、天然气或其他的燃气焊炬加热接头。将要连接的不同规格管路所需要的加热量决定了焊炬规格和喷嘴的大小,选择的喷嘴应该提供合适的喷射速度、迅速并均匀加热接头的柔和火焰。这个火焰调节成中性或稍微还原性火焰。中性火焰具有平滑、平稳且不带羽毛形状的内焰。

为了调节乙炔火焰达到中性状态,应从点火开始逐步调节,对射吸式焊炬,首先将燃气点燃,然后将火焰调节到恰巧不离焰,缓慢增加氧气的流量,直到羽毛状刚好消失,如果火焰强度不能满足要求,再交替增加或减少燃气量和氧气流量,直至达到所希望的火焰要求。

火焰应该首先加热管口处的插入管部分,它将膨胀并与套管紧密配合,然后集中加热外层套管,这时加热外层套管的热量通过热传导也同时加热了内部管。如果在缝隙中使用预成形钎料,控制热量使熔化钎料流入接头;如果采用送丝方式,要按照将钎料引向接头内部来加热。

火焰应该沿着管路轴向移动,如果管路直径大于 $\phi 100\text{mm}$ 或壁厚大于 2mm ,使用多头焊炬。在很短的加热过程之后,火焰交替对准管路和套管加热。这个过程的目的希望是在加热套管的同时也能通过热传导加热到两管之间的结合面,使两个工件同时到达一个温度。在套管或管路上的同一个位置加热时间太长将导致局部加热,使钎剂失效、管路变形,甚至烧损工件。

不良钎焊接头最常见的现象是过热。火焰的焰心不能直接紧密接触管路和套管的接口,以免使钎料和钎剂过烧,接口温度明显高于缝隙内的温度,影响钎料向缝隙中的毛细流动。因此,火焰应该保持运动,使热量均匀地分布在接头中。钎焊管路上合适的温度可以通过钎料与已加热的管路和套管之间的接头接触,观察钎料的流动来确定。管路上的钎剂受热后状态变化很明显,在钎焊温度下钎剂应该熔化变成清洁的液体。

当钎焊水平管路时,正确的做法是不论管路和套管是大的还是小的,按照加热管路的方法,使热量通过传到传递到套管内的插管中,随着焊炬来回缓慢移动,加热后的套管和管路保持温度均匀。

当管路和套管被均匀加热后,焊炬应移动到管路的下方 $1/4$ 处,将接头加热到熔化钎料的温度。当钎料开始熔化,毛细作用会将它吸收到接口的间隙中。同时,焊炬绕着套管向上部移动,恰好在火焰轨迹的前沿,套管已被钎料填满。对于大直径管路,使用第二个焊炬,同时从相反的一侧钎焊接头的底部和上部,热量不能直接应用到钎料上。如果焊炬火焰连续摆动到套管插口的底部或根部时,钎料会遍及整个接头。

(4) 管路接头的检验

对管路钎焊接头的检查,除了目测以外,在直径大于 $\phi 30\text{mm}$ 的管子接头上可采用超声波检验,但需要检验人员技术熟练、经验丰富,不能提供实验结果的永久记录。射线检验需要较长的时间得到结果,但是它能给出永久记录。

在制冷管路系统中,钎接头中致密性是最容易发生缺陷的缺陷,通常采用氦质谱检漏仪对接头进行逐个检查。气密性试验也是检验钎接头质量的常用方法,将充满气体的管路接头放在清洁的水中,观察有无气泡溢出。制冷系统的接头强度和寿命通常是靠钎焊材料选择、接头设计来保证。

3.4 火焰钎焊的安全与防护

火焰钎焊中的危险主要来源于不恰当地使用氧-燃气设备以及钎焊操作者暴露在有毒的烟气和气体中。这些都会导致焊接操作过程中出现事故,有时甚至造成严重的人身伤亡。

3.4.1 乙炔的燃烧爆炸特性

(1) 纯乙炔的爆炸特性

火焰钎焊常用燃气是乙炔。乙炔属于易爆炸气体,其爆炸特性如下。

① 纯乙炔当压力达 0.15MPa,温度达 580~600℃时,遇火就会发生爆炸,发生器和管路中乙炔的压力不得大于 0.13MPa。

② 乙炔与空气或氧气混合时,爆炸性会大大增加。乙炔与空气混合,按体积计算,乙炔占 2.2%~81%时;乙炔与氧气混合,按体积计算,乙炔占 2.8%~93%时,混合气体达到自燃温度(乙炔和空气混合气体的自燃温度为 305℃,乙炔与氧气混合气体的自燃温度为 300℃)或遇到火星时,在常压下也会发生爆炸。乙炔与氯气、次氯酸盐等化合,受日光照射或受热就会发生爆炸。乙炔与氮、一氧化碳、水蒸气混合会降低爆炸的危险性。

③ 乙炔如与铜、银等长期接触也能生成乙炔铜和乙炔银等爆炸物质。

④ 乙炔溶解在液体中,会大大降低爆炸性。

⑤ 乙炔的爆炸性与储存乙炔的容器形状和大小有关。容器直径越小,越不容易发生爆炸。乙炔储存在有毛细管状物质的容器中,即使压力增加到 2.65MPa 时也不会发生爆炸。乙炔发生爆炸与下述因素有关。

① 乙炔的分解与催化剂有关,实验表明,当压力为 0.4MPa 时,乙炔与不同性质的介质接触,产生爆炸的最低温度不同,如:与铁屑接触时为 520℃;与黄铜接触时为 500~520℃;与活性炭接触时为 400℃;与碳化钙接触时为 500℃;与氧化铁接触时为 280℃;与氧化铜接触时为 240℃;与氧化铝接触时为 490℃;与紫铜屑接触时为 460℃。

这些催化剂能把乙炔分子吸附在自己的表面上,结果使乙炔的局部浓度增高而加速了乙炔分子之间的聚合和爆炸分解。

② 乙炔的分解爆炸与存放的容器形状和大小有关。容器的直径越小,则越不容易爆炸。在毛细管中,由于管壁冷却作用及阻力,爆炸的可能性会大为降低。根据这个原理,目前使用的乙炔胶管孔径都不太大,管壁也比较薄,对阻止乙炔在管道内爆炸是有利的。

③ 乙炔与铜、银、水银等金属或其盐类长期接触时,会生成乙炔铜(CuC_2)和乙炔银(Ag_2C_2)等爆炸性混合物,当受到摩擦冲击时就会发生爆炸。因此凡供乙炔使用的器材都不能用银和含铜量 70%以上的铜合金制造。

④ 乙炔与氯、次氯酸盐等化合,在日光照射下以及加热等外界条件下就会发生燃烧和爆炸。所以乙炔燃烧失火时,绝对禁止使用四氯化碳灭火。

(2) 乙炔混合气体的爆炸性

乙炔及其他可燃气体凡与空气或氧气混合时就提高了爆炸危险性。乙炔和其他可燃气体与空气和氧气混合气的爆炸(发火)范围见表 3.11。

乙炔与空气或纯氧的混合气如果其中任何一种达到了自燃温度(与空气混合气体的自燃温度为 305℃,与氧气混合气体的自燃温度为 300℃),即使在大气压力下也能爆炸。是否会达到自燃温度而导致爆炸,基本上只取决于其中乙炔的含量。

表 3.11 可燃气体与空气和氧气混合气体的爆炸极限

可燃气体	可燃气体在混合气体中含量(体积分数)/%	
	空气中	氧气中
乙炔	2.2~81.0	2.8~93.0
氧	3.3~81.5	4.6~93.9
一氧化碳	11.4~77.5	15.5~93.9
甲烷	4.8~16.7	5.0~59.2
天然气	4.8~14.0	—
石油气	3.5~16.3	—

乙炔中混入与其不发生化学反应的气体(如氮气、甲烷、一氧化碳、水蒸气、石油气等),或把乙炔溶解在液体里,能够降低乙炔的爆炸性。这是因为乙炔分子之间被其他气体或液体的微粒所隔离,从而使之进行爆炸的连锁反应条件变坏的缘故。

乙炔能够溶解在许多液体中,特别是有机液体中,如丙酮等,在15℃、0.1MPa时,1L丙酮能溶解23L乙炔,在压力增大到1.42MPa时,1L丙酮能溶解乙炔400L。人们就是利用乙炔能大量溶解于丙酮这个特性,将乙炔装入有丙酮的乙炔瓶内来储存、运输和使用的。

(3) 乙炔中杂质及毒性

工业用的乙炔中经常含有磷化氢(PH_3)。这是由于电石中含有少量磷化钙等杂质,当电石与水接触时生成磷化氢。乙炔中磷化氢的含量取决于电石的纯度。在未经净化的乙炔内,可能含有0.03%~1.8%(体积分数)的磷化氢。磷化氢的自燃点很低。气态磷化氢(PH_3)在温度为100℃时,就会自燃,而液态磷化氢(PH_3)甚至在稍低于100℃时也会自燃。因而,当乙炔中含有空气、又有磷化氢存在时,就可能构成乙炔-空气混合气的爆炸起火。

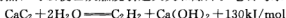
硫化氢(H_2S)是由于电石中含有硫化钙、硫化铝和碳酸钙等杂质,经水分解而生成的。乙炔中硫化氢的含量,在很大程度上取决于硫化钙与水的作用。因硫化氢能溶解于水,并在其生成与分解时,与水的温度有关,如在充足的水中进行分解时,可以减少乙炔中硫化氢的含量。乙炔中硫化氢含量的范围是0.08%~1.5%(体积分数)。硫化氢和磷化氢都是乙炔中的有害杂质。在焊接时,其中的硫和磷可能转移到熔接处的金属中,而使焊缝质量变坏。

一般规定,乙炔中磷化氢的含量不应超过0.2%(体积分数);硫化氢的含量应小于0.1%(体积分数)。

乙炔中毒现象较少见,它主要表现为中枢神经系统受损。其症状轻度的表现为精神兴奋、多言、走路不稳等;重度的表现为意识障碍、呼吸困难、发呆、瞳孔反应消失、昏迷等。也有表现为狂躁、无故哭笑等精神症状。

(4) 电石着火爆炸的危险性和毒性

电石属于遇水燃烧的危险品。电石与水化合极为活跃,同时生成乙炔气和氢氧化钙(熟石灰),并放出大量的热,可以使乙炔燃烧引起火灾和爆炸。电石与水的化合反应式为



应当指出,电石与水有很大的化学亲和力,它甚至能使空气中的水蒸气或含在盐类中的结晶水分解。因此,当水量不足、化学反应过程得不到很好的冷却时,上述电石分解的热量可能使反应区的温度上升得很高。如果温度不超过200℃,就能按下列反应生成CaO,即



在这种情况下,电石夺去 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 中所含的水分而分解,熟石灰成密实的外皮包围着电石块,能使它们淤积并且剧烈地过热。当温度超过 300°C 、压力超过 1.5atm (151978.5Pa),就可引起乙炔的燃烧爆炸。实际上在这种情况下,电石表面温度可达 $800\sim 1000^\circ\text{C}$ 。

考虑到上述各种原因,分解 1kg 电石实际上一般需要 $5\sim 15\text{kg}$ 水(包括分解用水和冷却用水)。这就是要安全使用乙炔发生器,就必须及时换水和供给足够水量的道理。

电石与水的分解速度(或乙炔气生成速度)是以每千克电石在分解时间内所产生乙炔气体(L)来说明的。它与电石的纯度、粒度及水的纯度和温度有关。

电石及水的纯度越高,分解速度越快,水的温度越高,也能加速分解。水中混有 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 会使电石的分解减缓。

电石块的尺寸大小(粒度)是影响分解速度的最主要因素。电石块的尺寸越小,速度越快。当电石的尺寸加大时,分解速度随之减缓,而每千克电石的乙炔总生成量则增加。最大的分解速度发生在电石与水接触的最初 $2\sim 4\text{min}$ 内,而后因为电石表面逐渐黏附熟石灰,分解速度逐步减缓。通常以电石产生乙炔总量的 98% 作为其完全分解的时间。对粒度尺寸为 $2\sim 8\text{mm}$ 至 $50\sim 80\text{mm}$ 的电石来说,其完全分解的时间变动于 $5.5\sim 13\text{min}$ 之间。

不同粒度的电石,其分解速度是不同的。因此在设计乙炔发生器时,应考虑并规定电石的粒度。如果违反规定采用小颗粒电石,则发生器内的气体压力迅速增大,部分乙炔就经安全阀排入大气,造成浪费。当安全阀失效时,就会发生事故。反之,大块电石分解速度缓慢,气体压力不稳定,影响焊接工作的顺利进行。

此外,在一般结构的发生器内,严禁使用电石粉(俗称芝麻电石),因为这种电石粉遇水后立刻分解,产生高热并结块,可促使乙炔自燃。当发生器内存有空气时,更会引起燃烧爆炸。

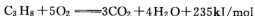
电石一般含有硅铁杂质。硅铁摩擦碰撞容易产生火花,往往成为乙炔燃烧爆炸的火源,发生意外的事故。硅铁来源于制造电石原料中的杂质,如石灰中含有硅酸以及电炉中的电极外壳的铁质落入炉料内等。

电石的毒性主要表现在其具有腐蚀作用,接触皮肤后会引起发炎和溃烂,像被石灰腐蚀一样,电石掉入眼中是危险的。电石由于含有磷化钙、砷化钙等杂质,与水作用会放出磷化氢和砷化氢,对人体也是有害的。

3.4.2 液化石油气的燃烧爆炸特性

液化石油气(简称石油气)是石油炼制工业的副产品。其主要成分是丙烷(C_3H_8),占 $50\%\sim 80\%$,其余是丙烯(C_3H_6)、丁烷(C_4H_{10})、丁烯(C_4H_8)等,在常温 and 大气压力下,组成石油气的这些碳氢化合物以气态存在。但是只要加上不大的压力(一般为 $0.8\sim 1.5\text{MPa}$)即变为液体,液化后便于装入瓶中储存和运输。

液化石油气易挥发,其中的主要成分丙烷沸点为 -42°C ,所以在低温时,它的易燃性是很大的。液化石油气燃烧不完全易使人中毒,其燃烧化学反应式(以丙烷为例)为



即 1 份丙烷(石油气)需要 5 份氧气与之化合(但实际需要量要比理论值多 10%)才能完全燃烧。如供氧不充分,燃烧就不充分,会产生一氧化碳,使人中毒,严重时致有生命危险。

石油气各组分都能和空气形成爆炸性混合物,但是它们的爆炸极限比较窄。例如丙烷、丁烷和丁烯的爆炸极限分别为 $2.17\%\sim 9.5\%$ 、 $1.15\%\sim 8.4\%$ 和 $1.7\%\sim 9.6\%$,比乙炔要安全得多。但石油气和氧气形成的混合气有较宽的爆炸极限,范围为 $3.2\%\sim 64\%$ 。液化石

油气与氧气混合的燃烧爆炸范围见表 3.12。

表 3.12 液化石油气与氧气混合的燃烧爆炸范围

序号	液化石油气在混合气体中所占比例(体积分数)/%	燃爆情况	序号	液化石油气在混合气体中所占比例(体积分数)/%	燃爆情况
1	3.2	爆声微弱	6	33.1	爆声响
2	6.0	有爆声	7	36.2	爆声响
3	6.7	有爆声	8	43	爆声响
4	12.9	有爆声	9	51.5	爆声强烈、发光
5	19.1	爆声较响	10	64	爆声强烈、发光

气态液化石油气比空气密度大(密度约为空气的 1.5 倍),易于向低处流动而滞留积聚,液化石油气比汽油密度小,能漂浮在水面上,随水流动并在死角处聚集,而且易挥发。使用、存储石油气时,应采取安全措施。

液化石油气对普通橡胶管和衬垫有腐蚀性,能引起漏气,必须采用耐油性强的橡胶导管和衬垫,不能随便更换而采用普通橡胶管和衬垫。

液化石油气在密闭容器内的压力与温度成正比。在 -40°C 时,压力为 0.1MPa,在 20°C 时,压力为 1MPa,在 40°C 时,压力为 2MPa。所以石油气瓶与热源、电暖气等应保持 1.5m 以上的安全距离,更不许用火烤。

石油气有一定毒性,空气中含量很少时,人呼吸了一般不会中毒,但当它的浓度较高时,就会引起人的麻醉,在浓度大于 10% 的空气中停留 3min 后,就会使人头脑发晕。石油气点火时,要先点燃引火物后再开气瓶阀门,顺序不能颠倒。

3.4.3 电石和乙炔发生器的安全要求

(1) 对电石运输、存储和使用的安全要求

① 电石的运输 搬运电石桶时,如发现电石桶桶盖密封不严等现象,应在室外打开桶盖放气后,再将桶盖盖严。严禁在雨天运输电石。电石桶上应贴上防火、防潮的标签字样。进出库搬运电石时应使用小车,轻搬轻运,电石桶不得在滑板或地面上滚动,防止撞击摩擦产生火花而引起爆炸。

② 电石的储存

a. 制好的电石应立即装入电石桶内。电石桶应放在木架上,不要放在潮湿的地方。桶盖要盖严,库内严禁烟火。

b. 电石库必须设置在不潮湿、不漏雨、不易于浸水的地面上,仓库的房屋必须是一、二级耐火建筑。库房顶应采用不燃烧的材料。库房应有良好的通风设施,一般可采用自然通风。库房应距离明火 10m 以上,禁止用地下室作电石仓库。

c. 电石库应保持干燥,严禁把热水管、自来水管和暖气管道通到库房里去,以防万一水管损坏,室内受潮,引起电石分解,产生乙炔气,使室内形成乙炔-空气混合气。

d. 电石库的照明设备应采用防爆灯。如无防爆灯,则应将电灯装在室外,使灯光从玻璃窗射入室内。电灯开关应采用封闭式的,装在库房外面。

e. 电石在进库之前,应仔细检查包装有无破损、受潮的现象。如发现可疑现象,应在室外打开桶盖,放出乙炔气体或混合气,然后入库。打开桶盖时,人应站在桶体侧面,以免爆炸时火焰冲出伤人。

f. 电石库内及其附近应备有干沙、二氧化碳、干粉灭火器具等。如电石仓库着火,不能使用含有水分的灭火器(如泡沫灭火器等)救火。水分可以助长或扩大火势,这是因为电石和金属钠、钾等一样,都是属于忌水物质。

使用二氧化碳灭火剂最适宜,但二氧化碳灭火剂也有缺点。因冷却作用不好,火焰熄灭后,温度可能仍在燃点以上,如不注意,有发生复燃的可能,因此二氧化碳适用于空旷地域的灭火。另外二氧化碳能够使人窒息。当空气中的二氧化碳含量达5%时,人的呼吸就会发生困难,超过10%时就能使人死亡。因此在喷射时,人要站在上风处,尽量靠近火源。在空气不流通的场合,喷射后应立即通风。

③ 电石的使用

a. 禁止使用火焰或可能引起火星的工具开电石桶。使用铜制的工具时,含铜量要低于70%。空电石桶在未经安全处理之前,不能接触明火,更不能直接焊接,否则是很危险的。

b. 电石桶中倒出的碎电石和粉末,不要随便乱倒,应有专人负责,并随时处理掉。最好集中倒在电石渣坑里,并用水彻底分解以妥善处理。电石渣坑上口应是敞开的,渣坑内的灰浆和灰水不得排入暗沟。除渣时应防止铁制工具、器件碰撞而产生局部火花。

总之,电石属于一级危险品,在装桶、搬运、储存、开桶和使用过程中如果处理不当,极易发生爆炸事故。为了保障操作工人的人身安全,防止工伤事故发生和减少经济损失,国家标准 GB9448《焊接与切割安全》中在电石、电石坑方面做了规定,在日常工作当中应严格遵守。

(2) 乙炔发生器安全使用要求

乙炔发生器是利用电石和水相互作用以制取乙炔的设备。乙炔发生器的操作人员必须经过专门的训练,熟悉其结构和工作原理,并经安全技术考核合格。

① 乙炔发生器的放置 移动式乙炔发生器可以安置在室外和通风良好的室内。严禁安置在锻打、锻造和热处理等加工车间以及正在运行的锅炉房内。固定式乙炔发生器应布置在单独的房间或专用棚内。乙炔发生器不应放在高压线下和起重机械处,也不能放置在靠近空气压缩机处、通风机的吸口处、避雷针接地导体附近以及可能由高处上方(如烟筒、高空作业点等)飞出烟气和受坠落物打击处。

乙炔发生器与明火、散发火花地点、高压电源线以及其他热源应保持水平距离10m以上。不准安放在剧烈振动的工作台和设备上。夏季使用移动式乙炔发生器时,严禁在烈日下暴晒。

② 使用前的准备工作 首先检查乙炔发生器的安全装置、管路、阀门和操纵机构等。确定正常后才能灌水 and 加入电石。

灌水时必须按规定灌入没有任何油污或其他杂质的洁净水。装电石时应根据发生器要求的定量来装,不能过满;其充装量一般不超过电石篮容积的2/3。电石的粒度必须符合发生器说明书上的规定。不得使用粒径超过80mm的电石,否则容易造成卡料。全天使用时,中间需换水。

冬季使用乙炔发生器时如果发生冻结,只能用热水或蒸汽解冻,严禁用明火烘烤,更不准用铁器等易产生火花的物体敲击。

③ 乙炔发生器的启动 乙炔发生器启动前应检查回火防止器的水位及发生器的各活动部件是否正常工作,正常后才能打开进水阀给电石送水,或通过操纵杆让电石下降与水接触产生乙炔,然后观察乙炔压力表、各处接头及安全阀等是否正常。

启动后若压力表的指针上升过快,甚至有气体从安全阀逸出,或者在启动后压力表的指针仍静止在零位,说明发生器运行不正常,必须立即停止,待检查并排除故障后,方可重新启动。

冬季启动时,中压移动式乙炔发生器有时在启动数分钟后,压力表的指针仍静止不动,这是由于电石在温度很低的冷水中分解慢的缘故,不一定是故障。

④ 使用过程中的管理和维护 在供气使用前应排除发生器中留存的乙炔与空气混合气。工作时,发生器各接头应保持良好密封,不漏气(检查时可用肥皂水,严禁使用明火),并注意回火防止器水位是否正常(无回火防止器时严禁使用)。如有漏气、水位不符合要求及安全装置失灵等现象,应及时采取措施解决,否则不允许使用。固定式乙炔发生器应由受过专门培训的专职人员管理。

运行过程中清除电石渣的工作,必须在电石完全分解后进行。水滴式乙炔发生器如发现有水从发气室溢出,而且压力表指针不动,则表示电石已完全分解,可以清渣。

⑤ 使用后的清理工作 发生器停用前,应先将电石篮提起脱离水面,或关闭进水阀使电石停止发气,然后再关闭出气阀门,停止乙炔输出。

工作结束(包括换电石时),打开发生器各罐体,其中的水和电石渣应全部排出,并冲洗干净,以免冻结,发生器如需修补焊接时,必须先彻底清刷,经检查确认无乙炔或电石残存物后方可进行,否则不得补焊。

3.4.4 气瓶的安全使用

火焰钎焊使用的气瓶有氧气瓶、乙炔瓶和液化石油气瓶等。氧气瓶是压缩气瓶,乙炔瓶是溶解气瓶,液化石油气瓶则是液化气瓶。

(1) 一般安全要求

① 乙炔使用时,最高工作压力禁止超过 147kPa 表压。

② 禁止使用紫铜、银或含铜量超过 70% 的铜合金制造与乙炔接触的仪表、管子等零件。

③ 乙炔发生器、回火防止器、氧气和液化石油气瓶、减压器等均应采取防止冻结措施,一旦冻结应用热水或水蒸气解冻,禁止采用明火烘烤或用铁器敲打解冻。

④ 气瓶、容器、管道、仪表等连接部位应采用涂抹肥皂水方法检漏,严禁使用明火检漏。

⑤ 气瓶、溶解乙炔瓶等均应稳固竖立,或装在专用胶轮车上使用。

⑥ 禁止使用电磁吸盘、钢绳、链条等吊运各类焊接与切割用气瓶。

⑦ 气瓶、溶解乙炔瓶等,均应避免放在受阳光暴晒或受热源直接辐射及易受电击的地方。

⑧ 氧气、溶解乙炔气瓶,不应放空,气瓶内必须留有余气,如氧气瓶内应留有不小于 0.1MPa 表压的余气,乙炔气瓶必须留有 0.05~0.1MPa 表压的余气。

⑨ 气瓶漆色的标志应符合国家颁布的《气瓶安全监察规程》的规定,禁止改动,严禁充装与气瓶漆色不符的气体。

⑩ 气瓶应配置手轮或专用扳手启闭瓶阀,戴上瓶帽。

(2) 氧气瓶的安全使用

氧气瓶应符合国家颁布的《气瓶安全监察规程》的规定。应定期进行技术检查,气瓶试压期和检验不合格的气瓶,均不准继续使用。

采用氧气汇流排(站)供气的车间,应执行《氧气站设计规范》的有关规定。氧气汇流排输出的总管上,应装有防止可燃气体进入的单向阀。

氧气瓶的使用注意事项如下。

① 使用氧气瓶前,应稍打开瓶阀,吹除瓶阀上黏附的细屑或脏污后立即关闭,然后接上减压表再使用。

② 开启瓶阀,操作者应站在瓶阀气体喷出方向的侧面并缓慢开启。避免氧气流朝向人体、易燃气体或火源。

③ 禁止在带压力的氧气瓶上以拧紧瓶阀和垫圈螺母的方法消除泄漏。

④ 严禁将粘有油脂的手套、棉纱和工具等与氧气、瓶阀、减压阀及管路等接触。

⑤ 操作中氧气瓶距离乙炔发生器、明火或热源应大于 5m。

⑥ 禁止单人肩扛氧气瓶。氧气瓶无防振圈或在气温 -10°C 以下时，禁止用滚动方式搬运氧气瓶。

⑦ 禁止用手托瓶帽来移动氧气瓶。

⑧ 氧气瓶不应停放在人行通道上，如电梯间、楼梯间附近，防止被物体撞击、碰倒；如有困难时，应采取妥善防护措施。

⑨ 禁止使用氧气代替压缩空气吹净工作服、乙炔管道，或用作试压和气动工具的气源。

⑩ 禁止用氧气对局部焊接部位通风换气。

(3) 气体减压器

氧气、溶解乙炔气、液化石油气等用减压器，必须选用符合气体特性的专用减压器。禁止在焊接设备上使用未经检验合格的减压器。减压器的安全使用注意事项如下。

① 各种气体专用的减压器，禁止换用或替用。

② 减压器在专用气瓶上应安装牢固。采用螺扣连接时，应拧足 5 个螺扣以上，采用专门夹具压紧时，装卡应平整牢固。

③ 同时使用两种不同气体进行焊接时，不同气瓶减压器的出口端都应各自安装单向阀，防止相互倒灌。

④ 减压器接通气源后，如发现表盘指针迟滞不动或有误差，应由当地劳动安全、计量部门批准的专业部门修理，禁止焊工自行调整。

⑤ 禁止用棉、麻绳或一般橡胶等易燃物作为氧气减压器的密封垫圈。

⑥ 液化石油气和溶解乙炔气瓶、二氧化碳等用的减压器必须保证位于瓶体最高部位，防止瓶内液体流出。

⑦ 减压器卸压的顺序是：先关闭气瓶的瓶阀，然后放出减压阀内的全部余气，最后放松压力调节杆使表针降到 0。

⑧ 不准在高压气瓶或集中供气的汇流导管的减压阀上挂放任何物件，如电焊钳、胶管、电焊电缆等。

(4) 溶解乙炔瓶

乙炔瓶是用于储存、运输乙炔的压力容器。乙炔瓶内装溶解乙炔，它是将乙炔溶解在丙酮溶剂中。乙炔瓶要比乙炔发生器安全得多。此外，还有节省能源、操作方便和减少公害等优点，因此，在国内已逐步取代了移动式乙炔发生器。乙炔在使用时应注意做到以下防火防爆措施。

① 溶解乙炔气瓶的充装、检验、运输、储存等均应符合《溶解乙炔气瓶安全监察规程》和《气瓶安全监察规程》的规定。

② 乙炔气瓶搬运、装卸、使用时都应竖立放稳，严禁在地面上卧放并直接使用。一旦要使用已卧放的乙炔气瓶，必须先直立后，静止 20min 再连接乙炔减压器进行使用。

③ 开启乙炔瓶瓶阀时应缓慢，不要超过 1.5 转，一般情况只开启 3/4 转。

④ 使用时必须配合合格的乙炔专用减压器，瓶体表面温度不得超过 40°C ，因为瓶温过高会降低丙酮对乙炔的溶解度，导致瓶内乙炔压力急剧增大。因此，使用过程中要经常用手触摸瓶壁，监测气瓶温度。

⑤ 乙炔瓶不能经受振动或撞击，以免填料下沉。

⑥ 禁止在乙炔瓶上放置物件、工具或缠绕橡胶管及焊炬等。

(5) 液化石油气

液化石油气常温下最大工作压力为 1.6MPa, 在储存、运输和使用过程中, 应遵守以下安全措施。

① 用于钎焊的液化石油气钢瓶的制造和充装量应符合《液化石油气钢瓶标准》的规定。瓶阀必须密封严实, 瓶座、护罩(护手)齐全。

② 采用液化石油气瓶集中供气的储存气瓶室和汇流排室的设计、管道设计应符合相应标准的规定。

③ 液化石油气瓶充灌不能过满, 按规定要求留 15% 的气化空间。

④ 所用衬垫、胶管要求用耐油橡胶制作, 以防腐蝕漏气。

⑤ 冷天使用时, 可用低于 40℃ 的温水加热, 但严禁用沸水或火烤加热, 使用时不得靠近加热炉等热源, 以免瓶内气体压力增大造成爆炸事故。

⑥ 要经常检查减压器工作状态是否正常, 保证安全运行。

(6) 钎焊用胶管

① 按现行标准, 焊接中使用的氧气胶管为黑色, 乙炔胶管为红色。

② 乙炔胶管与氧气胶管不能相互换用, 不得用其他胶管代替。

③ 氧气、乙炔胶管与回火防止器、汇流排等导管连接时, 管径必须相互吻合, 并用管卡严密固定。

④ 乙炔胶管管段的连接, 应使用含铜 70% 以下的铜管、低合金钢管或不锈钢管。

⑤ 工作前应吹除胶管内残存的气体。

⑥ 焊接前, 应检查胶管有无磨损、扎伤、刺孔、老化、裂纹等情况, 如有应及时修理或更换。

(7) 焊炬

① 焊炬内腔要光滑、气路通畅、阀门严密、调节灵敏, 连接部位紧密、不泄漏。

② 焊炬各气体通路均不得沾染油脂, 以防氧气遇到油脂而燃烧爆炸。

③ 焊嘴的配合面不能碰伤, 以防因漏气而影响使用。

④ 使用焊炬前应检查焊炬的射吸能力、气密性等技术性能及其气路通畅情况。此外, 应做定期检查维护。

⑤ 禁止用焊炬的嘴头与平面摩擦的方法来清除喷嘴内孔的堵塞物。

⑥ 焊炬零件烧损、磨损后, 要用符合标准的零件更换。

⑦ 在使用过程中发生回火, 应迅速关闭乙炔调节阀, 同时关闭氧气阀。等回火熄灭后, 再打开氧气调节阀, 吹除残留在焊炬内的余焰和烟灰, 并将焊炬的手柄前部放在水中冷却。

⑧ 焊炬停止使用后应挂在适当的场合, 或拆下橡胶管, 将焊炬存放在工具箱内。严禁将带气源的焊炬存放在工具箱内。

第4章 感应钎焊

感应钎焊是将焊件的待焊部位置于交变的磁场中,通过电磁感应在工件中产生感应电流来实现工件加热的一种钎焊方法。感应钎焊是一种局部加热钎焊方法,热量由工件本身产生,热传递快,加热迅速,广泛用于结构钢、不锈钢、铜及铜合金、高温合金、钛合金等材料制成的具有对称形状的工件的钎焊,感应钎焊特别适用于管件套接、管与法兰、轴与轴套类零件的连接。

4.1 感应钎焊的特点及应用

4.1.1 感应钎焊的特点

感应钎焊是利用高频、中频或工频感应电流作为热源的一种焊接方法,主要特点是依靠工件在交流电的交变磁场中产生感应电流的电阻热来加热。具体是将导电的工件放置在变化的电磁场中,感应加热电源给单匝或者多匝的感应线圈提供变化的电流,从而产生磁场,当工件被放置到感应线圈之间,并进入磁场后,涡流进入工件内部,产生精确可控、局域的热能,如图4.1所示。

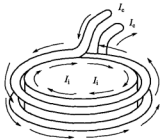


图 4.1 焊接工件中出现的感应电流
 I_c —线圈电流; I_i —工件内的感应电流

感应加热钎焊时,零件的钎焊部分被置于交变磁场中,该部分母材的加热则通过它在交变磁场中产生的感应电流的电阻热来实现。导体内感应电流强度与交流电的频率成正比,随着所用交流电频率的提高,感应电流增大,焊件的加热速度变快。当交流电通过导体时,导体表面处的电流密度较大,导体内部的电流密度较小。当高频电流通过导体时,导体截面上的电流密度差更加增大,电流主要集中在导体表面,这就是所谓的集肤效应。由于感应加热钎焊采取的是由内而外的加热方式,与激光加热钎焊不同,它的效果不受钎焊位置或接头变化的影响。

感应加热钎焊可以提供比烙铁焊接更快速、均匀的加热效果。烙铁头会磨损并且需要经常更换,而感应线圈因为采用非接触方式,所以几乎是无磨损的。用感应加热替代气体火焰进行钎焊有很多优点,能够在单位面积的材料上传导更多热量,其钎焊的温度通常在几秒钟就可以达到,从而促使加热周期更快,提高产量。

感应加热钎焊虽与电阻钎焊相似,热量都是电阻放热产生出来的,但是因为感应加热钎

焊热是电通过线圈而非母材产生的,因此大部分钎剂可以用于感应过程,而电阻钎焊则需对钎剂绝缘。

感应加热可以有选择地进行,允许使用者在较小的装配量或是不能对工件整体加热的情况下操作。在需要把热量约束在工件上的特定区域进行局部加热时,感应加热钎焊比其他钎焊方法具有更多优势。由于热量高度的局域性,焊点快速达到熔融所需温度而不必冒损坏工件的危险,因此,感应加热钎焊更节约,并且由于其高度可重复性,非常适合自动化、大规模生产工艺。以往感应加热主要用于焊接大型接头;目前,通过使用更精密的感应线圈、非接触式温度测量技术以及更精确地送丝和填料成形,感应加热被越来越多地用在非常细小的部件上,例如印刷电路板和基底。

感应加热还能够改善工作环境和提高安全性,无需气体,没有明火,无需额外加热,而且所有金属都可以进行感应钎焊。感应加热钎焊允许快速局部加热,以最小的强度损失连接高强度的元件,准确的加热控制可有效地进行持续的焊接。再者,感应加热对生产线的适应能力使得工件在装配上可进行更科学的布局,如有需要,也可通过电子遥控进行加热和控制。

高频感应钎焊由于频率高,加热迅速,应用广泛。高频感应加热焊接的优点如下。

① 加热速度快、生产效率高。高频感应加热单位功率高达 $500 \sim 1000 \text{ kW/m}^2$, 所以加热速度极快,大面积焊接所需时间只要几秒,可大大缩短焊接时间,提高生产率,降低生产成本。

② 热影响区小、对基体损伤小。高频感应加热的集肤效应使得待焊工件的加热深度很浅,甚至可以达到零点几毫米,仅仅依靠工件传热向芯部导热,工件任一点在进入感应器内时,被急剧加热到熔化温度,离开感应器就进入急剧冷却状态,几乎没有保温时间,加热时间极短,所以热影响区很小,基本不会损伤基体。另外,氧化皮生成极少,即使在空气中加热,坯料表面的氧化、脱碳也非常少。

③ 避免或减少界面脆性化合物的形成,焊接接头力学性能优异。由于感应加热速度快、能量集中、冷却时间短,获得的奥氏体晶粒细,所以感应加热的工件具有非常好的金相组织。用于异种金属焊接则因加热时间极短可以减少界面脆性化合物的形成,能够有效地提高接头的力学性能。

④ 实现复杂界面的焊接。感应器加热头可以根据不同工件的加热需要设计成相应的形状,而极短的加热时间能够实现局部加热,加热区温度迅速建立,温度过渡区较窄,这样感应器能够沿着复杂界面移动,从而实现复杂界面的焊接。

另外,高频感应加热焊接还具有节能、可重复性、易于自动化生产等优点。但感应钎焊也存在如下缺点。

① 配套系统复杂,尽管通过设计感应器能成功加热几何形状复杂的接头,但包含几个钎焊接头的复杂组件,加热难度很大甚至不可能实现。

② 部件装配难度大,感应钎焊要求将到连接部件的装配间隙适当减小。若采用手动送入钎料,可适当增加钎料用量以助于填满装配间隙;但感应钎焊较多是先将钎料预置在接头处,这不同于手动送进,如果使用固液相之间有明显温差的钎料,则钎料流动性较差,间隙变化太大,将阻碍钎缝的填充。

③ 设备初装费用高。感应钎焊设备特别适合半自动或全自动操作,主要包括感应发生器、工件运输、冷却系统和辅助装置等。在加工数量较少、没有现成的感应加热设备、不需要特殊要求的情况下,感应钎焊不能作为经济的钎焊方法来选用。

4.1.2 感应钎焊的应用

感应钎焊是靠感应线圈或感应器使接头内部产生感应电能实现加热的。一些产品的零部

件可以通过感应钎焊来进行连接,作为最后一道工序完成加工。连接区域的部件,包括将要被连接的部件表面,可以有选择地加热到钎焊温度。近年来,感应钎焊在工业中的应用越来越受到人们的重视,广泛用于工业产品、结构组件、电力和电子产品、微型设备、机器和手工工具以及空间部件等。

高频感应焊接可以节能,这是因为加热能量集中在焊点上。最常见的用途是高速焊管,它充分利用了局部加热和易于控制这两个特点。感应加热钎焊适合于钎焊钢、铝、黄铜、纯铜、铜合金、不锈钢、高温合金、铁和铸铁等具有对称形状的焊件,特别适用于管件的套接、管子和法兰、轴和轴套等接头形式的连接。

高频加热适合于焊接薄壁管件,采用同轴电缆和分合式感应线圈可在远离电源的现场进行钎焊,特别适用于大型构件,如火箭上需要拆卸的管道接头的焊接。而且,至今高频感应钎焊仍是金刚石锯片焊接的主要方法。

根据感应钎焊速度快的工艺优点,还开发出更多的可以采用钎焊连接的材料,如钛、锆、钼、陶瓷和石墨。这些材料通常被使用在控制环境中,即在还原性气氛或真空中,以避免被氧化和挥发。在还原性气氛中的钎焊可以在某些关键的电子件和空间部件装配时不使用钎剂,这样就排除了清除钎剂问题。

图 4.2 所示为使用平板感应器对表面镀锡直径为 $\phi 1.9\text{mm}$ 的纯铜毛细管与同样镀锡壁厚为 1mm 的温控器钢制膜盒底座的钎焊示意图。这种工艺采用的是两步感应软钎焊。第一步,使用锡铅钎料将毛细管钎焊到底座上,钎料棒被自动从上部或下部加入;第二步,钎焊铜的膜盒。较高的频率可用来调节循环继续还是停止,这类零件的感应钎焊大约 2s 就可以实现钎焊循环。

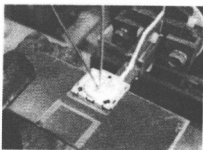


图 4.2 温控器钢制膜盒底座的钎焊

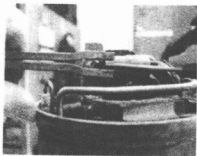


图 4.3 冰箱压缩机内部的高压排气管的感应钎焊

图 4.3 所示为冰箱压缩机内部的高压排气管的感应电焊过程,在大量生产这种高压排气管时,每套感应钎焊的时间仅为 $3\sim 4\text{s}$ 。钢件的钎焊采用铜基钎料,含有铜的焊件则可以采用含银 $40\%\sim 50\%$ 的银基钎料进行感应钎焊。

顺序感应钎焊可用于大型电子管组件中一组关键的不使用钎剂的钎焊接头。在顺序钎焊中使用递减熔化温度的钎料,以实现在非常接近的接头上钎焊。图 4.4 所示为电子管组件在无钎剂、控制气氛条件下采用顺序钎焊生产的感应钎焊接头。高度局部加热加上具有逐步降低熔化温度的各种合金的使用,可以生产出牢固的接头,而不破坏已有的钎焊部件。

例如,在一种电子管中,顺序感应钎焊通常先使用铜钎料在 1093°C 下钎焊;下一个接头在 1052°C 下,用金钎料钎焊;紧随其后的是具有递减熔化温度的银合金钎料在 900°C 、 802°C 、 749°C 等各个温度下钎焊。正确的做法是逐步降低温度来依次顺序地进行钎焊,形成完整的接头。

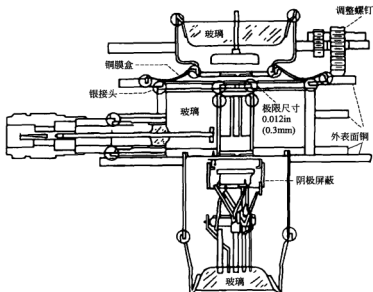


图 4.4 在无钎剂、控制气氛条件下采用顺序钎焊生产的感应钎焊接头

4.2 感应钎焊设备

4.2.1 感应设备的组成及作用

感应钎焊设备主要由交流电源装置（感应电流发生器）、感应线圈（感应器）和控制系統组成。在某些场合还带有辅助夹具和焊件抗氧化保护装置。感应钎焊设备原理见图 4.5。

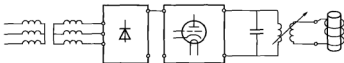


图 4.5 感应钎焊设备原理

(1) 交流电源装置

交流电源装置通常由电源、整流器、逆变器（或振荡管）、变压器、电容器组、控制系统、保护装置和冷却水系统等组成。整流器是将三相 50Hz 交流电网整流为所需幅值的直流电源，加到逆变器（或振荡器）两端上；逆变器的作用是将直流电源变换为所需频率的交流电源；变压器是使负载阻抗与电源要求相匹配，输出预计的频率；控制系统控制输出功率、加热时间、保温时间等。自动保护装置具有过流、缺水、缺相等保护功能，当发生故障时，设备会自动关闭，不再启动。

用于感应钎焊设备的加热功率（输出功率或振荡功率）一般在 1~60kW 范围内，工作频率在 0.5~400kHz 之间。目前实际应用较多的是 10~40kW 和 0.8~300kHz 的交流电源装置。交流电源装置按其频率不同可分为中频、超声频和高频三种。中频（1~10kHz）是由晶闸管中频交流电源装置产生。常用的超声频电源（20~100kHz）和高频电源（200~500kHz）可以是电子管式的，也可以是全固态晶体管式的。

高频电源根据主功率元件的种类可分为真空管振荡器类和半导体固体变频类两大类。随着变频技术及变频元件的发展,近年来半导体固态变频电源的应用越来越多,已成为中频和变频电源的主流。例如,以 IGBT 功率管为主要变频元件的固态变频电源已大量用于工业生产,这类设备的频率一般在 50kHz 以下,常用频率为 20kHz,比较适合大厚件及一般对升温速度要求不高的中小件的钎焊加热。

随着频率的升高,半导体变频技术难度增大,频率在 50kHz 以上时 IGBT 功率管已很难适应。过去常用的高频感应钎焊电源是真空管振荡器式电源。真空管振荡器能产生的频率范围为 200kHz~8MHz,一般最常用的设备频率为 150~600kHz。真空管振荡器式电源存在体积大、效率低、寿命短、不易实现精确控制等缺点,已逐步被半导体固体变频器件所取代。超高频感应设备普遍采用 MOSFET 器件,对于中小型设备,技术已经成熟,且智能化程度高,具有完善的参数控制和通信功能。采用的频率越高,加热越迅速,特别适合于薄件、小件的钎焊。

晶体管式高频电源与同样功率的电子管式高频电源加热设备相比,具有下述优点。

① 不使用价高、易损、耗能大的电子管和与其配套使用的阳极升压变压器、电子灯丝变压器等以及相关的冷却水系统。

② 电能转换效率高,可达 92%,节电达 1/3,节水 1/2。

③ 电路简单可靠、使用前无需预热,操作方便。

④ 体积小、重量轻、价格便宜,设备占地面积小,仅为电子管式的 1/3。

(2) 感应线圈

感应线圈是感应钎焊设备的重要器件,交流电源的能量是通过它传给焊件而实现加热的。因此,感应线圈的结构是否合理,对于钎焊质量和提高生产效率具有重大影响。正确设计和选用感应线圈的基本原则是:感应线圈应有与焊接工件相适应的外形,尽量减少感应线圈本身和焊件之间的间隙,以便提高加热效率。为了使焊件加热平稳、均匀,防止焊件尖角处发生局部过热,应当合理选择感应线圈的匝数和感应电流的交变频率等参数。

感应线圈的形状和尺寸取决于加热条件、被加热焊件表面的大小和形状、电源的功率和频率。设计感应线圈时,必须考虑单匝和多匝感应线圈、感应线圈节距、感应线圈与焊件耦合、多匝外热式和多匝内热式感应线圈等因素对焊件加热的影响。一般不采用间隙小于 2mm 的感应线圈,以免感应线圈与焊件形成短路。为避免间隙较小的焊件烧伤,可用石棉绳缠绕感应线圈使之绝缘。钎焊复杂焊件用的感应线圈和内加热式感应线圈可借助氧磁体来控制高频磁场和增加感应线圈的效率。

单匝感应线圈的加热宽度小,多匝感应线圈的加热宽度大。对多匝感应线圈来说,改变节距可使加热形态发生变化。节距小时,加热宽度小,加热深度大;节距大时,正好相反,但节距不能过大。感应线圈与工件的耦合对加热的影响也比较明显。原则上讲,感应线圈与工件的耦合,越紧越好,这时加热效率最高,加热均匀程度也比较好;当感应线圈与工件距离较大,即属于松耦合时,加热均匀程度进一步下降。当感应线圈与工件的距离较大时,改变感应线圈的形状与节距,则能改善加热形态,如增加感应线圈中间圈的直径或采用不等的节距。

对于多匝内热式感应线圈,为改善加热形态,也可用直径变化的感应线圈。对于单匝外热式感应线圈,可采用改变感应线圈面积的方法来达到均匀加热的目的。感应线圈的形式如图 4.6 所示。

图 4.6(a) 是能同时钎焊同一焊件上两个不同的接头的单匝感应线圈;图 4.6(b)~(d) 是可钎焊不同几何形状焊件的多匝感应线圈;图 4.6(e) 是钎焊硬质合金刀片的感应线圈;

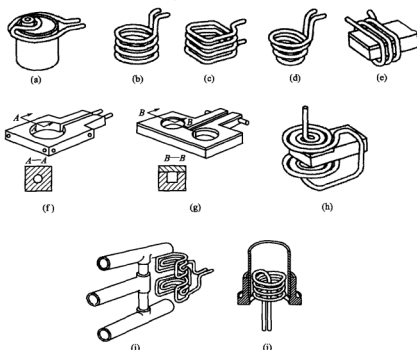


图 4.6 感应线圈的形式

图 4.6(f) 是由铜板加工成的单匝感应线圈，内钻有水冷却孔，其加热宽度比铜管制成的大；图 4.6(g) 是双位感应线圈，可同时钎焊两个焊件；图 4.6(h) 是扁平式感应线圈，适用于加热平面；图 4.6(i) 所示的感应线圈可同时钎焊两个接头；图 4.6(j) 为防止螺纹过热而采用的内热式感应线圈。感应线圈的形状和大小是多种多样的，它们是随焊件加热的需要而变化。在卫星和飞机上，有时需要在安装位置钎焊或拆卸导管，因此必须使用钎焊钳。图 4.7 是氩气保护钎焊钛导管的可拆分式钎焊钳。低电阻同轴高频电缆可将高频电流输送到 2~10m 之外钎焊。

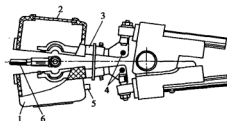


图 4.7 可拆分式钎焊钳

1—罩；2—观察窗；3—感应线圈；4—冷却水接管；5—氩气接管；6—被钎焊零件

感应线圈大部分由铜管制成，工作时内部通以冷却水。感应线圈的节距一般为 1.5~2.2mm，必要时，可根据工件的加热状态来进行适当的调整。

(3) 感应钎焊用夹具

在大多数涉及感应钎焊的应用中，需要辅助夹具来实现零件的夹持和定位，并保证零件

装配准确以及与感应线圈的相对位置。根据需要,夹具还具有通惰性气体保护焊接区域的功能,它们对于提高生产效率和保证钎焊质量具有重要作用。感应钎焊夹具一般要根据具体零件进行设计,特别是在自动或半自动感应钎焊设备中,夹具已经发展成为一套复杂的装置,并且在很多场合感应线圈与夹具已设计为一体化的结构,加热、定位、保护等功能进一步集成化。

对所有靠近感应线圈的夹具和输送设备的材料还有一些特殊要求。感应线圈所产生的电磁场并不完全包含在该线圈内部,而是伸展到线圈的外部,虽然距离很小,当夹具和辅助设备是电导体或距离线圈很近时,有可能被感应加热。当金属材料使用在夹具和传输设备上时,应该使用非电磁材料,例如奥氏体不锈钢或铝及铝合金。在夹具上、连接感应线圈的感应连接器或机头中的金属回路应该避免采用封闭式的设计。为了安全,应该记住,感应线圈应采用陶瓷铸造包覆或用绝缘材料包缠,裸露的线圈是危险的。

4.2.2 感应钎焊机

感应钎焊可分为手工、半自动和自动三种方式。手工感应钎焊时,焊件装卸、钎焊过程实施和参数调节都由手工操作完成。这种方式只适用于简单焊件的小批生产,生产效率低,对操作者的技术水平要求高,但具有较大的灵活性。例如,有时可以借助断续通电加热来实现零件的均匀加热。

半自动感应钎焊时,焊件的装卸和通电加热仍靠人工操作,但钎焊过程的参数控制、断电结束是借助时间继电器或光电控制器自动控制完成的,可较好地保证加热参数的一致性。航空构件大多采用半自动感应钎焊方法。

自动感应钎焊使用的感应线圈是盘式或隧道式,工作时感应线圈一直通电,利用传送机构或转盘把焊件连续送入感应线圈中。焊件所需的加热参数是靠调整传送机构的运动速度,控制焊件在感应线圈中的时间来保证的。这种方式生产效率高,主要用于大批量生产。

感应钎焊机通常由高频电源、机械装置(包括工作台及其气动升降机构或工作台的转动机构、二维微调机构及焊件夹具)以及水冷系统、气路系统和电控系统组成。感应钎焊机大多为专用设备,生产率高,焊缝质量稳定可靠。感应钎焊机在制冷行业(如冰箱和空调的主阀体与两端管及毛细管、先导阀阀体与导管、电磁换向阀、四通换向阀等)、电机行业(如发电机绕组、变压器绕组)、航天工业(液体火箭发动机推力室、卫星导管)以及其他一些工业部门(如不锈钢/铝复底锅、铜散热器、涡轮叶片、汽车换向器、硬质合金锯片)获得了广泛应用。

(1) 半自动感应钎焊机

半自动感应钎焊机焊件的装卸工序及启动是由人工操作的,而钎焊过程全部自动进行。以铜散热器高频感应钎焊专用机为例:钎焊采用 SP-30B 型高频电源,感应线圈是扁盘式。机械装置有气动升降机构、二维微调机构及焊件夹具。电控系统主要由时间继电器、无触点开关和从焊接电源内获取的钎焊结束信号搭建的控制回路,实现电路上的控制。

当带动感应线圈的汽缸下降到加热位置、汽缸上的无触点开关闭合,继电器带电,延时 2s 后,钎焊机开始加热—保温—冷却。电源发出钎焊结束信号、使汽缸上升,取出焊件,一个工作过程结束。整个钎焊过程全部由根据流程图编制的 PLC 程序控制。

半自动感应钎焊机属间歇性工作机械,主要用于中小批量生产。半自动感应钎焊通常采用钎剂保护钎焊,但也可在氩气保护下或在真空容器中进行钎焊。

(2) 自动感应钎焊机

自动感应钎焊机是利用传送带或转盘连续不断地将焊件送入和带出加热位置,感应线圈呈盘式或隧道式,如图 4.8 所示。

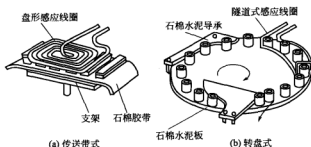


图 4.8 自动感应钎焊机

工作时，感应线圈一直通电，由焊件送进速度来控制加热参数。这种感应钎焊机生产效率，主要用于小件的大批量生产。

4.3 感应钎焊工艺

4.3.1 感应钎焊接头设计

与其他钎焊方法相同，感应钎焊接头也必须正确设计并达到要求的公差值，以使填充金属得以正常流动；对母材上的氧化物必须完全清除，以保证提供充足的湿润性，防止其表面再度氧化。

感应钎焊接头设计的注意事项包括加热方式、预置钎料的方式、装配部件的间隙和将要连接材料的热膨胀系数及电特性等。感应钎焊典型的接头设计如图 4.9 所示。

当受到工作线圈的感应耦合时，为了得到最好的结果，钎料不能形成封闭环。另外，预置的钎料将受到电磁的保护，避免在接头表面达到钎焊温度之前被溶解。有时为了保护接头形状不被破坏，通常把钎料放到组件的内部，或在一个部件上设计凹槽。

接头间隙大小影响钎料的填充，在一定范围内液体上升的高度随间隙的减小而增大，图 4.10 所示为铜板间钎料的填缝高度与间隙的关系。当接头间隙在 0.14mm 左右时，钎料有最佳的填充能力。如果使用不同的加热方式或不同的钎料，待钎焊部件以不同的速度膨胀，设计时应考虑由于不同的膨胀而预留一定的间隙，以保证加热到钎焊温度时能有合适的接头间隙。采用银基钎料感应钎焊同类材料时，接头间隙一般控制在 0.038~0.051mm 范围内。

一般接头间隙越小，焊接应力越大，反之亦然。接头间隙过小时，会发生“挤死”和“钎不透”，使接头强度下降和焊接应力增加；而间隙过大，毛细作用减弱，也会导致“钎不透”，使接头强度下降。因而大小适中的接头间隙对减小焊接应力和增强焊缝牢度有很大的作用。

接头厚度也是影响接头残余应力的主要因素之一。图 4.11 所示是采用抗拉强度为 448MPa 的银基钎料，钎焊抗拉强度为 1100MPa 的不锈钢时，接头厚度对抗拉强度的影响。随接头厚度的增加，不锈钢钎焊接头抗拉强度逐渐减小，这是接头厚度对焊缝受力时的内应力和焊缝刚性产生较大的影响所引起的。

对于存在应力集中、较高的残余应力或在不同材料中收缩量不同的接头，应避免接头的强度超过钎料的强度，或接头部件材料的热膨胀系数相差较大。如碳化钨硬质合金和碳钢之间存在明显的热膨胀系数差别，当碳化钨硬质合金处于拉应力时特别不利，容易导致硬质合金一侧开裂。在这种条件下，可采用“夹芯”钎焊方法。它是利用一个覆盖钎料的带钢（如在钢带双面镀银钎料）进行钎焊。在这种钎焊条件下，如同在较低的屈服强度条件下发生塑性变形一样，减小接头的应力。

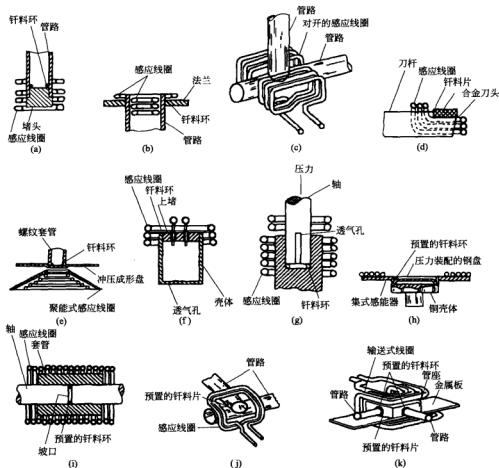


图 4.9 感应钎焊典型的接头设计

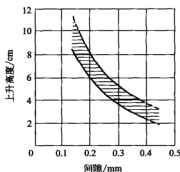


图 4.10 钎料上升高度与接头间隙大小的关系

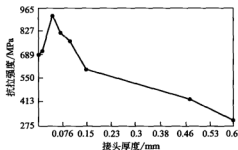


图 4.11 接头厚度对感应钎焊接头抗拉强度的影响

4.3.2 感应钎焊用钎料和钎剂

(1) 钎料

大多数类型的钎料均可用于各种材料的感应钎焊，并且可以提供在特殊场合下满足特殊

要求的产品。适合于感应钎焊钎料的基本要求如下。

- ① 能够湿润并合金化将要连接的表面。
- ② 熔点低于被连接材料部件的熔点。
- ③ 靠毛细管作用,适当的流动性可以使钎料填满缝隙。
- ④ 接头具有合适的强度、导电性、抗腐蚀性,满足应用中的力学、电气、化学等特点。

许多钎料可以满足钎焊合金比金属熔点低以及连接表面合金化的要求。银基钎料的应用领域非常广泛,可以通过感应方法钎焊黑色金属或有色金属。

感应钎焊时,焊件置于感应线圈中或近旁,难以送进钎料,因此宜在装配时预先先把钎料和钎剂安放好,可使用片状、丝状、粉状、膏状或预先制成的钎料。安置的钎料不宜形成导电的封闭环,以免因自身的感应电流加热而过早熔化。由于加热迅速,应选用毛细作用好、填充间隙能力强的钎料。

感应钎焊温度一般在 $621\sim 843^{\circ}\text{C}$ 范围变化,钎料固相线和液相线温度差的变化,能明显影响钎料的流动性。在感应钎焊中,有时也可采用银基或铜基钎料,钎焊温度的变化最高能达到纯铜的熔点 1083°C 。BAg45CuZnCd 钎料熔点 620°C ,允许使用在相对较低的温度,因此消耗最小的能量。在感应钎焊的部件上,有限的冶金变化会减小工件氧化,并且降低清除残渣的难度。这种钎料的熔化范围窄,流动性好。

钎料 BAg35CuZnCd 熔化范围较宽 ($542\sim 702^{\circ}\text{C}$),流动性好,有利于填满钎缝或难以填充装配的接头。BAg50CuZnCdNi 中镍的加入有助于改善湿润性和塑性,用于感应钎焊铸铁与钢、不锈钢等。三元合金钎料 BCu80AgP,由于与铜有自钎剂作用,经常被使用在感应钎焊铜或铜合金中,但不能用于黑色金属的钎焊,因为它易与铁形成磷铁脆性化合物。

共晶钎料 (72%Ag-28%Cu) 的熔点接近 780°C ,因为不含有挥发性成分(如钙和锌),经常使用在控制气氛的感应钎焊中。银含量 65%~72%的钎料,在珠宝工业中,当连接银部件时,会形成良好的相匹配的颜色。当金属需要高的连接温度时,Cu-Au 或 Cu 钎料适于控制气氛的感应钎焊。

感应钎焊可以使用各种形状的钎料,以适应感应钎焊快速加热或局部加热的要求。一些钎料也可以通过在基本金属表面镀上一层复合层来获得,例如,在铜的两面分别镀上一层厚度为 $0.06\sim 0.25\text{mm}$ 的薄钎料,这种包覆材料在接头冷却过程收缩或工作中承受相当大的应力时使用。成形钎料可以被预置在自动操作和控制钎料数量的场合,它们节约了材料,并能生产出外形均匀的产品。

(2) 钎剂及保护气氛

感应钎焊常采用含有氟盐和碱的钎剂,有时还采用含钾的钎剂,尤其是使用银钎料时。这些钎剂一般以膏状形式使用,钎焊时,用刷子或用自动处理设备将钎剂涂覆在工件上。温度达 593°C 时,钎剂变成流体并具有活性,使钎焊表面的氧化物分解,对待连接的金属表面起到保护作用。同时这些钎剂也促进了湿润性和钎料在熔点以上的流动性。

感应钎焊可在空气、保护气氛和真空中进行。在空气介质中钎焊时必须采用钎剂,可以使用液态或膏状的钎剂,在装配时均匀地涂于待焊区表面和钎料上。保护气氛中钎焊时,焊接区需置于气体介质的保护之内,主要采用三种方式形成对钎焊区域的保护:一是采用局部封罩将焊件套在有保护气体的罩之内;二是将被焊工件和感应线圈均引入可控气氛的工作箱内;三是将工件直接置于由气体介质形成的气流场内进行加热。第三种方式主要针对小件钎焊,在保护气喷嘴吹拂下即可实现良好的保护和钎焊。

采用局部封罩时,工件置于容器中,感应线圈的安放又有置于封罩容器内和置于封罩容器外两种方式。置于封罩容器内时,感应线圈直接加热工件,此时容器应选用玻璃、陶瓷等

不导电材料, 为方便钎焊过程的观察, 最好选用透明材料。置于封罩容器外时, 感应线圈加热容器, 靠容器向工件的热传导来加热工件, 此时容器应为导热材料。另外还有一种新的局部保护感应钎焊方法, 即采用良好导电材料制成一对开的水冷保护罩, 感应线圈在保护罩的外面, 感应线圈通电时, 由感应线圈产生的一次交变磁场和由水冷保护罩形成的二次交变磁场叠加, 形成对工件的加热。这种方法保护罩外面保持低温, 特别适合飞机装配现场的导管连接。

气氛保护的另一种重要方法是在可控气氛的工作箱内完成钎焊, 该方法可以获得很好的保护效果, 已成为航空航天结构的主要钎焊工艺, 采用的设备主要是真空-惰性气体钎焊工作箱。该类设备主要由真空-惰性气体工作箱和感应加热电源两部分组成。其中, 真空-惰性气体工作箱为一真空箱体, 并在真空箱的一侧开有橡胶手套操作口, 可以抽真空和充入惰性气体。感应加热电源通过同轴电缆将感应线圈连接引入至真空工作箱内部。工作时先将一批零件装配好后放入工作箱内, 抽真空排气后充入惰性气体, 操作者通过密封的手套操作口和观察窗逐个完成每个零件的感应钎焊操作。

感应钎焊也可在真空环境中完成, 此时不能通过手套操作, 零件的变位送进需由送进机构完成。真空感应钎焊时, 由于稀薄的气体很容易被击穿电离而放电, 因此应特别考虑真空内高频传输导线和感应线圈的匝间绝缘问题, 一般传输导线和感应线圈及连接处均应作绝缘保护。

4.3.3 钎焊工艺参数

感应加热钎焊的工艺参数一般包括加热温度、加热速度及焊后冷却等。这些因素的波动会对焊缝质量造成不良影响, 尤其是在金属中产生较大的焊接应力, 因此必须要适当匹配组合。

(1) 加热温度

感应钎焊时提高焊接温度, 固体和液体的表面张力都减小, 但是液体的表面张力减小得更严重。因为随着温度的升高, 分子在其平衡位置振动的幅度增大, 分子扩散加快, 同时, 随着温度的升高, 那些热动能较大的分子能克服液体分子的引力而成为蒸发分子, 因而液体的密度减小, 分子间的吸引力也随之减小, 表面能降低, 因此表面张力也就减小了。所以在一定温度内接触角随着温度的升高而线性下降。另外, 提高温度还能破坏金属表面的氧化层以及降低液态钎料的黏度。因此应将钎料的液相线看作钎焊时可采用的最低温度, 钎焊接头的整个截面必须加热到钎料液相线或者更高的温度, 但在高温下液态金属容易蒸发, 因此焊接温度一般比钎料的熔点高 $30\sim 70^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 加热速度

加热速度也是影响钎料的润湿、填充以及焊后工件残余应力大小的一个重要因素。接头区域的温度明显受到加热速度的影响, 加热速度取决于感应发生器的规格和控制线圈中交流电的能力。低功率一般减小加热速度, 提供了热传导的时间, 平衡了加热区域的温度, 但降低了生产效率。感应发生器的规格取决于将要连接部件的尺寸和重量。

常用的三种感应发生器形式是电动机、固态和摆管发生器。固态装置单元的频率范围在 10kHz 以下, 一般用于代替电动机单元。具有几百千瓦功率的固态单元输出频率可以达到 50kHz , 能够产生 $100\sim 200\text{kHz}$ 的输出频率。使用在感应钎焊领域的摆管发生器工作频率在 $150\sim 450\text{kHz}$, 功率水平可以达到 200kW , 特殊要求时可以更高。摆管发生器工作在 $2\sim 8\text{MHz}$ 时常用于钎焊非常薄的工件。

感应加热时, 导体内的感应电流强度与交流电的频率成正比, 随着所采用的交流电的频率升高, 感应电流增大, 焊件的加热速度加快。基于这一点, 感应加热大多使用高频交流

电,但还应考虑频率对交流电集肤效应的影响。通常将85%的电流所分布的导体表面层厚度称为电流渗透深度,用以表征集肤效应的强弱。电流渗透深度与电流频率有关,频率越高,电流渗透深度越小,电流渗透深度与频率的关系见表4.1。

表4.1 电流频率与各种材料的电流渗透深度的关系

电流频率/Hz	电流渗透深度/mm			
	钢(<768℃)	钢(>768℃)	铜	铝
50	2.5	92	9.5	11
2×10^3	0.5	14	1.5	1.8
10^4	0.2	6	0.67	0.8
10^5	0.07	2	0.21	0.25
10^6	0.02	0.6	0.07	0.08
10^8	0.002	0.06	0.007	0.008

频率的增加虽然使表层迅速加热,但加热的厚度越来越薄,零件的内部只能靠表面层向内部的热传导来加热。由此可见,选用过高的频率并不是有利的。频率的选取还需考虑设备的能力,若采用固态变频设备,因受变频元件工作范围的影响,频率选择需在20~30kHz的范围。高频感应钎焊时,工作频率并不是固定的,由于不同的感应线圈及工件构成的感抗不同,振荡回路根据不同阻抗有一自匹配的过程,其工作频率为一定范围。

电流渗透深度也与材料的电阻系数和磁导率有关,电阻系数越大,磁导率越小,则电流渗透深度就越深。例如,钢在温度低于768℃时,磁导率很大,集肤效应显著;温度高于768℃时,磁导率急剧减小,集肤效应也随即减弱,有利于均匀加热。非铁磁性金属如铜、铝等,磁导率较小,集肤效应都较小。因此在确定钎焊工艺参数时,必须考虑材料的有关物理性能对电流渗透深度的影响。

当感应钎焊异种材料时,非常快的加热速度扩大了电导率和热传导的影响。例如一个接头中包含钢和铜,一般来说需要缓慢的加热速度,期望将要连接的部件表面和填充金属的表面温度尽可能地均匀。另一个问题是随着功率密度的增加,电磁场引起工件的相对运动,这样也容易导致不合格的组件。同样,接头两端部件重量明显不同时,低的加热速度有助于使两边的温度均匀。在感应钎焊薄壁管与厚壁管接头时,低的加热速度提供了通过热传导达到均匀温度的时间。为了调整两端部件重量差造成的问题,感应发生器应该是无级调节,整个范围的功率控制意味着从零到额定载荷。

(3) 焊后冷却

除了采用低熔点、高韧性钎料等降低残余应力的措施之外,焊前预热和焊后热处理是降低残余应力的有效手段。采用焊前预热(400℃×2h)加焊后热处理(400℃×24h)能大大地降低残余应力,焊缝剪切强度提高10%~30%。例如,在硬质合金与钢的焊后冷却过程中,给硬质合金施加额外的压力能有效地降低残余应力,增强焊缝的剪切强度,其中施加的压力为60MPa时比不施加压力的焊缝剪切强度提高21%。

在特殊场合下,钎焊和淬火可以在单一的感应加热过程中完成。例如,硬质合金刀头能被钎焊到钢刀杆上,同时钢刀杆被淬硬。一般使用钎焊温度在815~900℃范围内的钎料,事实上提供了奥氏体化的钢刀杆,刀杆材料的组织没有过分粗化。钎焊和淬火的工艺过程包括以下方面。

① 固定硬质合金刀头、钢杆和预置钎料(涂有钎剂)。

② 加热达到钎料流动的温度。

③ 冷却到钢杆的转变温度（取决于钢的类型，一般 650℃ 或更低），同时钎接头凝固。

④ 在适当的淬火介质中淬火硬化。

⑤ 如果需要，回火至所需要的硬度，如果接头这样设计，硬质合金由于不同的收缩率而被压缩，可获得最好的结果。

在采矿工业中，大多数硬质合金工具在 1038℃ 采用铜钎料进行钎焊，冷却到 870~900℃ 范围内，然后在油中或合适的水-聚合物的淬火溶液中淬火。

不锈钢管氩气保护感应钎焊工艺参数见表 4.2。

表 4.2 不锈钢管氩气保护感应钎焊工艺参数

适用于焊件管径尺寸/mm	φ6×1	φ8×1, φ10×1
钎焊电源	30kW 真空电子管式电源	30kW 真空电子管式电源
频率/kHz	250	250
输出功率/kW	6	6~7
感应线圈内径/mm	φ22~24	φ24~26
钎料 HLCuNi30-2-0.5	φ1.5mm(丝)	φ1.5mm(丝)
通电加热前通氩气时间/s ≥	2	8
通电加热时间	钎料熔化后 1~2s 停电	钎料熔化后 1~2s 停电
断电后通氩气冷却时间/s ≥	70	70
氩气工作压力/MPa	0.01~0.03	0.01~0.05
氩气流量/L·min ⁻¹	13~15	13~15

4.3.4 导管接头的安装式感应钎焊

某飞机不锈钢管系统采用感应钎焊连接，其连接工艺分为固定式感应钎焊和安装式感应钎焊两种，其中安装式感应钎焊技术是在装配现场完成导管接头的安装钎焊。导管高频感应钎焊装置由以下部分组成。

① 高频电源：高频电发生装置。

② 温度控制器：控制钎焊温度及保温时间。在温度控制器上有两块显示仪表，一块用于显示热电偶所测温度，另一块用于显示光电二极管所反馈的信息值。

③ 软式感应线圈：将电源能量传递给工件的装置。焊接时将其缠绕在焊接保护器上，通过高频感应将能量传递给工件。

④ 光电二极管：焊接时将光电二极管固定在焊接保护器上，通过光电信号反映焊接区温度。

⑤ 热电偶：试样焊接时，直接测量焊接区温度。

⑥ 焊接保护器：导管安装钎焊的主要工装，具有冷却水通道和保护气体通道。焊接前，用其将焊接区套住并夹紧，将软式感应线圈缠绕在其上，在导管接头焊接区形成惰性气体保护区。

图 4.12 为导管安装感应钎焊示意图。安装感应钎焊时，接头形式基本为简单的导管对接，安装感应钎焊的核心技术是采用了两半对开保护夹具和柔性感应线圈技术，对开保护夹具采用铜合金制造，夹具内充入氩气，在被钎焊处形成良好的氩气环境，以利于钎焊过程的进行，夹具本身通水冷却；感应线圈采用可缠绕和拆卸的柔性感应线圈，缠绕在对开夹具外面与同轴电缆相连接，柔性感应线圈内可通水冷却。钎焊时，高频功率通过同轴电缆远距输送至柔性感应线圈，加热保护夹具内的导管和钎料实现钎焊。焊后柔性感应线圈和两半对开夹具可以方便地拆下。

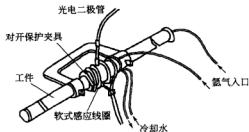


图 4.12 导管安装感应钎焊示意图

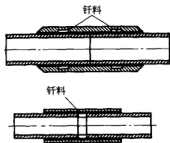


图 4.13 导管安装感应钎焊接头结构形式

不锈钢导管及套筒材料为 1Cr18Ni10Ti，钎料为 Cu-Ni-Mn 带状钎料，预先弯制成开口的环状。接头具有两种结构形式，见图 4.13。对于直径小于 10mm 的导管，钎料装配在套筒内导管对接的间隙内；对于直径大于或等于 12mm 的导管，钎料装配在开有料槽的套筒的料槽内。

钎焊前导管和导管套筒钎焊面预先镀锡。对待焊导管、套筒采用棉布蘸溶剂擦拭后将接头及钎料装配到位，保证 0.05~0.10mm 的钎焊间隙。装上对开保护夹具，缠绕好柔性感应线圈并将其连接到水冷同轴电缆上，开始通水冷却，对开保护夹具和导管内通入氩气，然后接通高频电源，按照预先标定好的参数升温到钎焊温度，由光电传感器控制钎焊加热温度。保温完毕后关闭感应加热电源，降温，保持通保护气和冷却水 5min 后拆开对开保护夹具，检查钎焊质量。

对于直径为 36mm 的薄壁导管，钎焊温度为 1050~1080℃，加热时间 40s，保温时间 16~18s。

钎焊接头按要求全部进行外观检查，外观检查主要包括两个方面，即成形和表面氧化。进行 100%X 射线检查，每月抽一个试样进行金相检查。

4.4 感应钎焊操作安全与防护

4.4.1 高频电磁场对人体的危害及防护

感应钎焊是将钎焊件放在感应线圈所产生的交变磁场中，依靠感应电流加热焊件。感应电流的强度与感应回路中交变电流的频率成正比。频率越高，感应电流越大，加热速度越快。但是高频感应加热电源在工作过程中高频电磁场泄漏严重，对其周围环境构成严重的电磁波污染。主要表现为无线电波干扰和对人体健康危害两个方面。同时污染的强度又和高频电源的功率成正比。所以感应钎焊时，必须对高频电磁场泄漏采取严格的防护措施，以降低对环境和人体的污染，使其达到无害的程度。

高频电磁场对人体的危害主要是引起中枢神经系统的机能障碍和交感神经紧张为主的植物神经失调。主要症状是头昏、头痛、全身无力、疲劳、失眠、健忘、易激动、工作效能低，还有多汗、脱发、消瘦等症状发生。但是造成上述机能的障碍，不属于器质性的改变，只要脱离工作现场一段时间，人体即可恢复正常，采取一定防护措施完全可以避免高频电磁场对人体的危害。

生产实践经验表明，对高频加热电源最有效的防护是对其泄漏出来的电磁场进行有效屏蔽。通常是采用整体屏蔽，即将高频设备、感应线圈等放置于屏蔽室内。操作人员在屏蔽室外进行操作。屏蔽室的墙壁一般用铝板、铜板或钢板制成。板厚一般为 1.2~1.5mm。操作

时对需要观察的部位可装活动门或开窗口，一般用 40 目（孔径 0.45mm）的钢丝屏蔽活动门或窗口。

对于功率较大的高频设备，还可用复合屏蔽的方法增强防护效果。通常是在屏蔽室内将高频泄漏源（高频变压器），先用金属板或双层金属网进行局部屏蔽，为了解决高场强的近区装置的发热问题，屏蔽需留有适当的缝隙，以切断电流，这当然对高频防护是不利的。

此外，为了高频加热设备工作安全，要求安装专用地线，接地电阻要小于 4Ω 。而在设备周围，特别是工人操作位置要铺耐压 35kV 绝缘橡胶板。设备启动操作前，仔细检查冷却水系统，只有水冷系统工作执行时，才允许通电预热振荡管。

4.4.2 感应钎焊操作的安全事项

感应钎焊操作的安全事项主要体现在如下几个方面。

- ① 电气设备。
- ② 含有腐蚀性的钎剂。
- ③ 热的材料。
- ④ 在控制气氛钎焊中潜在的爆炸危险。
- ⑤ 在清洗和预处理中使用的化学品。

主要预防措施如下。

- ① 为接通发生器提供安全的开关。
- ② 在感应线圈上作涂层，用绝缘物包裹，机械覆盖。
- ③ 隔离机头和其他附属电气设备。

在一些材料被感应钎焊连接的同时，从钎剂和钎料中散发出的有毒烟尘和气体，在缺少通风的场合下会危害操作者。大多数钎焊熔剂在高温时散发出具有腐蚀性的烟尘，某些钎焊材料含有挥发性的镉，因此钎焊场所要求通风良好。

设备检修一般不允许带电操作，如实在需要带电检修，操作者必须穿绝缘鞋，戴绝缘手套，必须另有专人监护。停电检修时，必须切断总电源开关，并用放电棒将各个电容器组放电后，才允许进行检修工作。

第5章 真空炉中钎焊

真空炉中钎焊又称真空钎焊,是指在真空条件下,不施加钎剂而实现材料连接的一种较为先进的钎焊方法。由于钎焊过程处在真空条件下,可以有效地排除空气对工件的不利影响,得到的接头光亮致密,具有良好的力学性能和抗腐蚀性能。采用真空钎焊方法可以实现那些采用一般钎焊方法难以连接的金属和合金的连接,如铝合金、钛合金、高温合金、难熔金属及陶瓷等。目前,真空钎焊工艺不仅在航空航天、核工业、石油化工、电子电器工业中成为重要的生产手段,而且在船舶、车辆及能源等行业也得到了推广和应用。

5.1 真空钎焊接头的形成及设备

5.1.1 真空钎焊接头的形成

真空钎焊时,为了获得优质的钎缝,关键是要使液态钎料能够充分流入并充满接头间隙、与母材充分润湿,很好地进行相互扩散和物理化学作用,从而得到合乎要求的钎焊接头。但在钎焊的高温作用下,母材和钎料的表面均可能很快地生成一层薄氧化膜,阻碍两者的接触和相互作用。为了实现钎焊过程,必须彻底清除并防止继续生成这种氧化膜。在其他钎焊方法中,主要是通过钎剂的化学作用或介质气体的还原作用去除氧化膜。在真空钎焊时,不使用钎剂或气体,去除氧化膜是通过真空条件本身来实现的。

真空钎焊接头的形成,可概括为三个相互关联的过程来实现:真空条件下氧化膜的去除过程,钎料填充接头间隙过程,钎料与母材相互进行物理化学作用过程。真空钎焊时,钎料填充接头间隙过程以及液态钎料与母材的作用与其他钎焊方法原理相似,但真空状态下钎缝中氧化膜的去除机制与其他钎焊方法不同。

真空钎焊过程中,不同的母材具有不同的氧化膜去除机制。即使对同一种母材,在不同的钎焊温度下,去膜机制也可能不同。真空条件下氧化膜的去除机制是以下几种作用相互促进与制约的结果。

① 真空状态降低了钎焊区的氧分压,导致了氧化物的分解。根据物理化学理论,任何氧化物的分解将会使它的分解压增高,这只有当其周围气氛中氧的实际分压低于氧化物的分解压时才有可能。而真空状态的实现,正是造成实际氧分压下降的有力措施。

表5.1列举出了一些金属氧化物分解所需要的分解压,通过理论计算可知,一般金属氧化物分解所需的真空度是非常高的,因此,这一作用不是主要的去膜途径。

表 5.1 某些金属氧化物在 738℃ 时的分解压

金属氧化物	分解压/Pa	金属氧化物	分解压/Pa
CuO	480	Cr ₂ O ₃	10 ⁻¹⁷
NiO	10 ⁻³	MnO	10 ⁻¹⁷
Fe ₂ O ₃	10 ⁻⁷	B ₂ O ₃	10 ⁻¹⁸
MoO ₃	10 ⁻⁷	V ₂ O ₅	10 ⁻¹⁸
WO ₃	10 ⁻⁸	TiO ₂	10 ⁻²²
SiO ₂	10 ⁻¹¹	Al ₂ O ₃	10 ⁻²⁷

② 金属氧化物及合金元素的挥发,破坏了金属表面的氧化膜。真空状态下,一些氧化物的挥发温度显著低于其在大气中的挥发温度。所以在真空钎焊时,这些氧化物会发生不同程度的挥发,从而对钎焊接头氧化膜产生一定的破坏作用。

③ 表面氧化膜被母材中的合金元素还原而去除。例如真空钎焊 1Cr18Ni9Nb 不锈钢,当钎焊温度高于 900℃ 时,不锈钢表面的氧化膜可被碳还原而去除。

④ 氧化膜被母材溶解而去除,例如真空钎焊钛及钛合金,在真空条件下,温度高于 200℃ 时,钛的氧化膜会强烈地溶解于钛中而被去除。

⑤ 液态钎料的吸附作用使氧化膜强度下降,并由于热物理性能的不同,使氧化膜破碎弥散而被去除。在钎焊铝及铝合金时,Al₂O₃ 薄膜的破碎去除就十分典型。另外,碳、镁等元素均能与 Al₂O₃ 作用,使其变为低价氧化物,降低其致密性,而有利于破碎去除。

综上所述,真空不仅能够避免因使用钎剂带来的夹渣、焊后清洗、产品腐蚀、污染环境等问题,而且能促成去膜过程的进行,得到很好的去膜效果,消除了其他气体介质钎焊时在钎缝中形成气孔的可能性。因此,真空钎焊往往能比其他钎焊方法获得更好的接头质量。

5.1.2 真空钎焊的特点

真空钎焊技术能够得到迅速的发展和应⽤,主要是因为它与其他钎焊方法相比,具有一系列的优点。

① 真空钎焊过程中,被钎焊工件处于真空条件下 ($10^{-4} \sim 67.5\text{Pa}$ 范围),不会出现氧化、增碳、脱碳及污染变质等现象,焊接接头的清洁度好,强度较高。

② 钎焊时,钎焊温度低于基体金属的熔点,对基材影响小,零件整体受热均匀,热应力小,可将变形量控制到最小限度,特别适宜于精密产品的钎焊。

③ 基体金属和钎料周围存在的低压,能够排除金属在钎焊温度下释放出来的挥发性气体和杂质,可使基体金属的性能得到改善。

④ 因不用钎剂,所以不会出现气孔、夹杂等缺陷,提高了基体金属的抗腐蚀性,避免污染,可以省掉钎焊后清洗残余焊剂的工序,节省时间,改善了劳动条件,对环境无污染。

⑤ 可将工件热处理工序在钎焊工艺过程中同时完成。选择适当的焊接工艺参数,还可将钎焊安排为最终工序,而得到性能符合设计要求的钎焊接头。

⑥ 可一次钎焊多道邻近的钎缝,或同炉钎焊多个组件,钎焊效率高。

⑦ 可钎焊的金属种类多,特别适宜钎焊铝及铝合金、钛及钛合金、不锈钢、高温合金等,也适宜于钛、锆、铌、钼、钨、钽等同种或异种金属的钎焊连接,真空钎焊也适用于复合材料、陶瓷、石墨、玻璃、金刚石等材料。

⑧ 开阔了产品的设计途径。可以钎焊带有狭窄沟槽、极小过渡台、盲孔的部件和密闭容器、形状复杂的零部件,无需考虑由钎剂等引起的腐蚀、清洗、破坏等问题。

但是,真空钎焊也存在如下缺点。

① 在真空条件下金属易挥发,因此对含易挥发元素的金属和钎料不宜使用真空钎焊。如确需使用,则应采用特殊的工艺措施。

② 真空钎焊对钎焊前零件表面粗糙度、装配质量、配合公差等的影响比较敏感,对工作环境要求高。

③ 真空钎焊设备一次性投资大,维修费用高。

5.1.3 常用的真空钎焊设备

真空钎焊设备主要由真空钎焊炉和真空系统两部分组成。真空钎焊炉大致分为两种类

型,即热壁炉和冷壁炉。两种真空炉可以采用燃气加热或电加热,并可设计成侧壁炉、底装炉和顶装炉(坑式)结构。真空系统可以通用。

(1) 热壁炉

热壁真空钎焊炉采用真空室和加热器分开的形式(见图5.1)。它的特点是在室温时先将装有钎焊工件的容器中的空气抽出,然后将容器推进真空室内,在炉中加热钎焊工件时,抽真空与加热升温同时进行。钎焊后容器可以退出炉外冷却,缩短了生产周期,并可防止母材晶粒长大。热壁炉内真空钎焊大多要求真空泵在整个热循环中连续工作,以去除炉内部件释放出来的气体。在尺寸和最高加热温度方面,热壁真空炉受到钎焊温度下承受高压的能力限制。

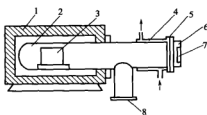


图5.1 热壁真空炉示意图

- 1—电炉；2—真空容器；3—工件；4—冷却水管；5—密封环；6—容器盖；7—窥视孔；8—接真空系统

这种类型的钎焊炉使用温度可高达1150℃,但是大多数都限制于870℃或更低,加热炉可以采用普通的工业电炉。真空容器内部没有加热元件和隔热材料,不仅结构简单,容易操作,而且加热中释放的气体少,有利于保持真空。为提高生产率,同时备有几个钎焊容器,交替进入、退出炉膛进行钎焊和冷却。因此设备投资少,生产率高。但是容器在高温、真空条件下受外界大气压力作用,易变形,故适用于小件、小批量生产。大型热壁炉则常采用双容器结构,即加热炉的外壳也设计成低真空容器,但结构的复杂化使其应用受到限制。

一些大型设备内,在热壁真空炉工作室外侧与炉子加热元件之间有一个单独的真空区,这种结构称为双泵或双壁甌式真空,因为工作室在钎焊温度下不再承受高压,它允许采用较薄的甌壁材料。这种炉型的优点是加热元件和隔热材料也都不承受高压,因而这种构件的使用寿命得以延长。

(2) 冷壁炉

冷壁真空炉真空室建立在加热室内,即加热室与真空钎焊室为一体。采用这种类型的钎焊炉,真空钎焊之后工件必须随炉冷却,限制了生产率。其内有隔热材料和电热元件,真空室通常是水冷的。为了使辐射热集中在工件上并防止热量散失到炉壁,在加热元件与炉壁之间放有适当的隔热屏(常采用多层钼、钨、钽、石墨或其他高温材料制成)。炉中温度可高达2200℃、压力可低于 1.35×10^{-4} Pa。

另一种冷壁真空炉的炉壁采用双层水冷结构。内置热反射屏,它由多层表面光洁的薄金属板组成。根据炉子的使用温度不同,反射屏材料选用钼片或不锈钢片。其作用是防止热量向外辐射,减轻炉壳受热且提高加热效率。在反射屏内侧分布有加热元件,依照炉子的额定温度而选用不同的加热体:中温炉一般选用镍-铬或铁-铝合金;高温炉使用钼(1800℃)、钨(2500℃)、钽(2200℃)、石墨(2000℃)。

冷壁炉工作时,炉壳由于水冷和受到反射屏屏蔽,温度不高,能很好地承受外界大气压,故适于大型焊件的高温钎焊。它的加热效率也较高,但使用时需先抽真空再加热,钎焊后焊件只能随炉冷却,且低温阶段炉温下降缓慢,因此生产率低。但如采用双室或多室连续冷壁炉,不破坏加热室的真空度,焊件的装炉、钎焊、冷却可连续操作,生产率可以提高。

(3) 真空系统

真空系统主要包括真空机组、真空管道、真空阀门等。用于钎焊的真空炉,应具有中、高级真空度。真空机组通常由旋片式机械泵和油扩散泵组成。单用机械泵只能得到低于 1.35×10^{-1} Pa级的真空度。要获得高真空,必须同时使用油扩散泵,此时能达到低于1.35

$\times 10^{-4}$ Pa 级的真空度。系统内的气体压力用真空计测量。通常, 低于 1.35×10^{-1} Pa 真空度时使用热偶真空计测定; $1.35 \times 10^{-1} \sim 1.35 \times 10^{-4}$ Pa 真空度范围采用电离真空计测定。

机械泵分旋片式和滑阀式两类。旋片式机械泵工作原理如图 5.2 所示, 吸入口 C 与被抽容器或扩散泵相接。容器中的气体被旋片 S 压缩, 由排出口 D 排出, 随着 S 连续重复动作, 直至泵的极限真空度。

滑阀式机械泵的工作原理与旋片式相似, 只是结构上用套管代替旋片。

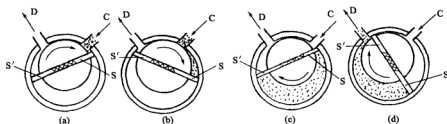


图 5.2 旋片式机械泵工作原理

油扩散泵的工作原理如图 5.3 所示。它利用电炉加热油扩散泵, 达到沸腾温度后, 油蒸气由喷口高速向下喷出, 在喷口附近形成一个压强差, 泵口附近的气体分子被吸收并扩散到油蒸气中, 随之集结在泵的底部。当其压力达到机械泵的极限真空度后, 即被机械泵抽出, 而油蒸气则经过冷阱冷凝后又回到油槽, 如此周而复始地工作。

真空管路系统还设置有冷阱、油分离器、高真空阀等。其中冷阱是为了防止油蒸气和油分子进入炉内污染真空室而设置的。冷阱安装在油扩散泵与真空阀之间, 能使大部分蒸气沉淀于油扩散泵与真空阀之间, 油蒸气到达冷阱时即被冷凝, 滴回扩散泵的油槽内, 冷阱的结构如图 5.4 所示。机械泵不仅要抽出给定气体, 如氢、氮等, 还要抽出混有粉尘杂质的蒸气。

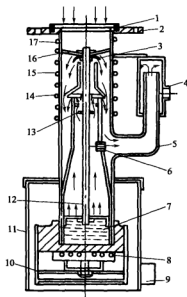


图 5.3 油扩散泵原理

- 1—密封圈; 2—法兰盘; 3—第三喷口; 4—前级泵接口; 5—管道; 6—第一喷口; 7—油槽; 8—加热电炉; 9—电炉接头; 10、11—隔热罩; 12—集合螺套; 13—油阱; 14—第二喷口; 15—冷水管; 16—稳定装置; 17—泵壳

油尘分离器串联在扩散泵与机械泵之间, 对来自扩散泵的油尘和冷凝气体进行分离和过滤, 保护机械泵免受更大的磨损, 其工作原理如图 5.5 所示。

真空管路中安置的阀门主要有高真空阀、真空放气阀和真空充气阀等。

① 高真空阀的主要功能是当处于关闭状态时, 使扩散泵免受氧化; 在打开状态时, 使炉子通过抽气系统得到低损耗的抽空。圆柱形结构与冷阱合并作用, 能有效阻止油蒸气倒流入炉内。

② 真空放气阀分手动和电动两种, 用来控制阀门的“通”与“闭”, 以接通或切断电源, 保证炉内通气。

③ 真空充气阀是向炉内充填惰性气体的阀门, 其结构与放气阀近似, 仅比放气阀多一个气门。在手动真空炉中, 还装有手动挡板阀, 用汽缸带动阀

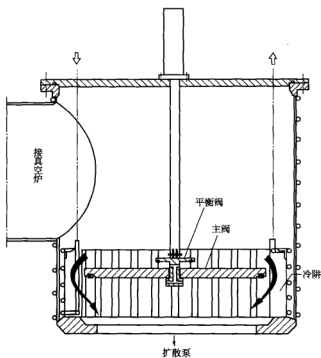


图 5.4 高真空阀及冷阱结构

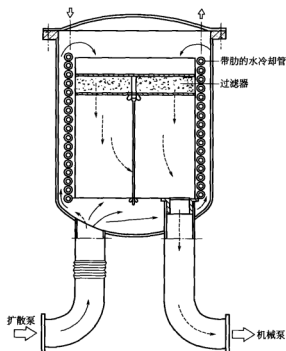


图 5.5 油尘分离器工作原理

盖而使阀门开闭，一般多用手工操作，使阀盖作横向移动而开闭阀门。

5.2 真空钎焊用钎料

5.2.1 真空钎焊对钎料的要求

由于真空条件的特殊性，为获得高质量的钎焊接头，真空钎焊时，所用的钎料必须满足以下几项基本要求。

① 钎料组分不含易挥发的元素，如锌、镉、锂等；蒸汽压高的纯金属也不宜作为真空钎焊用钎料。但含蒸汽压高的元素时，应视其形成的钎料本身蒸汽压是否高，如磷的蒸汽压在 704℃ 时为 10^3 Pa，但在镍基钎料中形成的 Ni_3P 蒸汽压在 704℃ 为 10^{-2} Pa。

② 钎料中的非金属组分（如黏结剂、助熔剂等），在钎焊过程中挥发后不能对钎缝成形或真空设备产生有害影响。

③ 熔化温度合适，能在毛细作用下比较容易地填充钎焊间隙，并能与母材产生良好的合金化作用，形成高强度接头。

④ 在无钎剂除氧化膜的真空气氛中对被钎焊材料具有良好的润湿性，并在钎焊温度下有足够的流动性。

⑤ 钎料可用形式能满足全位置接头所需，获得钎缝应满足设计和使用要求。

此外，还应考虑钎料的经济性，尽量减少或不含稀有或贵重金属等。

5.2.2 真空钎焊常用钎料

(1) 铝基钎料

铝的熔点较低（660℃），蒸汽压也极低（800℃ 约为 10^{-2} Pa），用作真空钎料较为合适。一般铝基钎料主要是以铝与其他合金元素的共晶为基础的。真空钎焊用铝基钎料多是在铝硅共晶的基础上，添加少量能改善润湿性的元素镁组成的。因为镁是极强的活化剂，钎焊过程中，镁蒸气既可与钎焊气氛中剩余的氧或水蒸气中的氧结合，保护零件不致重新氧化，又可能渗入零件表面未清除干净的氧化膜而将其去除。不含镁的铝基钎料几乎无法在真空中钎焊铝及铝合金。

由于现有的铝基钎料的熔化温度大都接近铝合金的熔化温度，对钎焊过程中要严格控制钎焊温度提出了苛刻的要求。因此，进一步研制性能优良、熔化温度更低的铝基钎料，成为促进铝及铝合金真空钎焊的关键。

(2) 银基钎料

银熔点为 960℃，室温强度高，塑性和加工性能好，导热、导电性能优良，有良好的抗腐蚀性能，但用纯银做钎料存在着钎焊温度高、高温强度低、对黑色金属润湿性能差等缺点，因此银基钎料是弥补纯银钎料的如上不足而研制的。

银基钎料中，由于铜能显著降低银的熔点，银铜合金的金相组织为固溶体和共晶体组成，所以银铜共晶钎料在电子工业中钎焊铜及铜合金、钛及钛合金、可伐合金等得到了广泛的应用。但是，这种钎料对黑色金属、不锈钢及高温合金等润湿性很差。为此，在银铜合金中加入钼、磷、锡、铟、镍、硼、钛、锰、锂等元素，形成一系列熔点较低、强度较高、润湿性能好的钎料。

(3) 铜基钎料

铜的熔点较高（1083℃），塑性较好，强度中等，耐腐蚀，抗氧化性能较差，蒸汽压较高（在 1083℃ 时约为 1Pa）。为了克服纯铜作为钎料的缺点，分别加入磷、锗、锡、镍、锰、

钼、钴、金、银等元素,形成一系列铜基钎料。它们塑性好,可加工成各种规格。

纯铜对钢、高温合金、硬质合金等都有较好的润湿性,做真空钎焊用钎料经济适用。但由于纯铜在 250~550℃ 之间极易氧化,容易产生裂纹,所以不推荐用于工作在 200℃ 以上的接头。另外,纯铜蒸气压力较高,用纯铜钎料进行真空钎焊,要在钎焊温度下控制炉内压力为 5Pa 以上,才能防止铜的大量挥发。在炉内压强不能调节的设备中,应限制使用纯铜钎料。另外,因为铜大量蒸发会污染炉膛,导致炉内绝缘失效,热偶控温失灵,清理工作烦琐。

纯铜和铜基钎料广泛应用于真空充氩钎焊铜及铜合金、可伐合金、电子器件、碳钢、合金结构钢和不锈钢等。但是,大部分铜基钎料的钎焊温度较高(多在 1100℃ 以上),在此温度下保温时间过长,会引起母材晶粒长大。

(4) 镍基钎料

镍具有极好的抗氧化性和耐腐蚀性能,有良好的塑性及中等的强度,纯镍作为钎料主要用于钎焊铜、钨等难熔金属。但是,镍熔点高(1452℃),热强度不足。为此常加入其他元素,主要有铬、硼、硅、钨、锰、磷、铜、碳、金和钼等。

但镍基钎料一般是复杂的多相结构,蒸气压低,特别适宜在真空气氛中钎焊。主要用于钎焊在高温下或腐蚀介质中工作的零件,是真空钎焊中使用最为广泛的一类钎料。

(5) 锰基钎料

锰的熔点较高(1314℃),蒸气压力也较高(1020℃ 时为 13Pa),不宜在高真空中使用。锰与镍能够形成一系列固溶体。当镍含量为 3.95% 时,锰镍合金的熔点为 1005℃。为了进一步降低熔点,改善抗热性和抗腐蚀性,加入铬、钴、铜、铁、硼等合金元素,能形成一系列性能各异的锰基钎料。

锰基钎料具有较高的室温和高温强度,中等抗氧化性能和较好的耐低温、耐腐蚀性能,对不锈钢无明显的熔蚀及晶间渗入现象,适宜钎焊薄壁构件。钎焊工艺性能好,能填充较大的接头间隙。主要用于钎焊碳钢、合金钢、不锈钢及高温合金。钎缝在 500℃ 左右能够长期使用。采用锰基钎料进行钎焊时,真空度不宜过高,同时加热速率要尽量快些,以防止锰的过量挥发而改变钎料组分及熔化温度。通常真空度为 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ Pa。

(6) 钴基钎料

钴的熔点高(1495℃),钴-铬、钴-镍均能形成固溶体,综合力学性能优良,因此,钴基钎料多是以 Co-Cr-Ni 固溶体为基加入其他元素组成的。

Co-Cr-Ni 固溶体熔化温度较高,加入硼能大幅降低熔化温度。但硼易与钴形成 Co_3B 脆性化合物。为了减少 Co_3B 的生成,常常加入硅来降低钎料的熔化温度。此外,加入钨能够进一步提高钎料的高温性能。常用钴基钎料的化学成分及熔化温度见表 5.2,蒸气压低,熔蚀性小,具有很高的高温性能,特别适合于钎焊钴基合金。

表 5.2 常用钴基钎料的化学成分及熔化温度

钎料牌号	化学成分(质量分数)/%	熔化温度/℃	钎焊温度/℃
BCo47CrNiSiW	Cr18~20; Ni16~18; Si7.5~8.5; W3.5~4.5; Fe1.0; B0.7~0.9; Co.35~0.45	1105~1150	1150~1230
BCo70CrWBSi	Cr20~22; W4~5; B2~3; Si1.2~1.6	1118~1230	1230~1250

(7) 金基钎料

金具有强度高、塑性好、电性能优良以及蒸气压低等优点,可广泛用于钎焊金属及其合金。但金价格昂贵,熔点较高,致使应用受到限制。为了降低熔点,改善润湿性,增加热强性及节约贵金属,常常加入镍、铜等元素,组成各种金基钎料,如表 5.3 所示。由于金基钎

料成本高,主要用于钎焊电子器件及钨、钼等难熔金属。

表 5.3 金基钎料的化学成分及熔化温度

名称	牌号	化学成分(质量分数)/%	熔化温度/℃	钎焊温度/℃
金铜钎料	BAu80Cu	Cu19.5~20.5	910	890~1010
	BAu72Cu	Cu27.5~28.5	930~940	940~1060
	BAu63Cu	Cu36.5~37.5	930~980	1000~1080
	BAu50Cu	Cu49.5~50.5	950~975	975~1050
	BAu80CuFe	Cu18.5~19.5; Fe0.8~1.2	905~910	910~1000
金铜镍钎料	BAu82CuNi	Cu16~17; Ni1.9~2.2	910~925	950~1060
金铜银钎料	BAu75CuAg	Cu22.5~23.5; Ag1.2~1.5	885~895	895~950
	BAu60CuAg	Cu19.5~20.5; Ag19.5~20.5	835~845	850~950
金镍钎料	BAu82Ni	Ni17.5~18.5	950	950~1005
	BAu75Ni	Ni24.5~25.5	950~990	1020~1080
	BAu65Ni	Ni34.5~35.5	977~1075	1075~1150
金钯钎料	BAu92Pd	Pd7.5~8.5	1200~1240	1240~1280
金钯镍钎料	BAu50PdNi	Pd24.5~25.5; Ni24.5~25.5	—	—

金基钎料的共同特点是:钎缝组织不形成金属间化合物,对钎焊间隙不敏感,形成的接头塑性好;钎缝中合金元素不发生偏聚,对钎焊加热冷却速率没有特殊要求;抗氧化性能与镍铬钎料接近,在650℃以下具有良好的抗氧化性;熔点适宜,钎焊不锈钢时,既能满足母材的固溶处理要求,又不会引起晶粒长大。

(8) 钛基钎料

钛的比强度高,耐腐蚀性能优良,属于活性金属,对陶瓷、石墨等非金属有非常强的活化作用。蒸气压低,但熔点高(1690℃)。钛与铜能形成多种低熔点共晶。当镍在钛中含量达到30%时,也能形成955℃的钛镍共晶。这些共晶钎料熔点低,流动性好,但塑性差。为了改善钎料性能,提高强度,在钛中加入锆、铍、锰、钴、铬等元素形成如表5.4所示的一系列钛基钎料。这些钎料抗氧化性能强,耐腐蚀性能优异,润湿性好,对大部分金属和部分非金属都能润湿。广泛用于钛及钛合金、钨、钼、钽、铌、石墨、陶瓷、宝石等材料的真空钎焊、扩散钎焊和封接。

表 5.4 钛基钎料的化学成分及熔化温度

名称	牌号	化学成分(质量分数)/%	熔化温度/℃	钎焊温度/℃
钛铜钎料	BTi92Cu	Cu7~9	790	790~850
	BTi75Cu	Cu24~26	870	870~920
	BTi50Cu	Cu49~51	955	955~1020
钛镍钎料	BTi72Ni	Ni28~29	955	965~1020
钛铜镍钎料	BTi70CuNi	Cu14~16; Ni14~16	900~940	950~980
钛锆铍钎料	BTi48ZrBe	Zr47~49; Be3~5	890~900	940~1050
钛铜铍钎料	BTi49CuBe	Cu48~50; Be1~3	900~955	997~1020
钛锆镍铍钎料	BTi43ZrNiBe	Zr40~42; Ni1.2~1.5; Be2~4	800~815	850~1050
钛钯钎料	BTi53Pd	Pd46~48	1080	1100~1150

(9) 钼基钎料

钼是贵金属,熔点高(1550℃),蒸气压极低。钼能够完全溶于银、铜、镍中形成固溶

体,这是钎基钎料的基础。但是这些固溶体熔化温度较高,为了降低熔化温度,改善性能,可加入锰、硅、硼、金等合金元素,形成如表 5.5 所示的一系列钎基钎料。

表 5.5 钎基钎料的化学成分及熔化温度

名称	牌号	化学成分(质量分数)/%	熔化温度/℃	钎焊温度/℃
钎钴钎料	BPd65Co	Co34~36	1230~1235	1235~1250
钎镍钎料	BPd60Ni	Ni39~41	1238	1240~1250
钎镍金钎料	BPd34NiAu	Ni35~37; Au29~31	1135~1166	1166~1200
钎镍硅钎料	BPd55NiSiBe	Ni44~45; Si0.48~0.5; Be0.25	1150~1160	1166~1200
钎银硅钎料	BPd81AgSi	Ag14~15; Si4.5~4.8	705~760	760~790

钎基钎料具有良好的塑性和加工性能,能以各种形式使用。强度和抗腐蚀性中等;对母材熔蚀性低;润湿性极好,能够润湿和浸流于多种金属和陶瓷等非金属表面。钎的蒸气压比金还要低,特别适宜在真空中钎焊密封组件。多用于高温部件、电子工业及原子能等工业领域。

此外,适用于真空钎焊的钎料还有近几年发展起来的新型钎料——非晶态钎料。非晶态钎料具有较好的适应性,已被应用于板翅式冷却器、散热器、蜂窝结构、消音装置、电子元器件、陶瓷与石墨的真空钎焊或电阻钎焊等领域。

5.2.3 钎料的工艺性能

钎料的工艺性能直接影响钎缝的形成和接头的性能。目前,钎料工艺性能的评定方法有多种,在此仅介绍国内几种常用的评定方法。

(1) 钎料对母材的润湿性

钎料对母材的润湿性试验所选的钎焊温度即为钎料的流动温度,保温 5~20min 后冷却出炉,如图 5.6 和图 5.7 所示,测定润湿角或铺展面积。

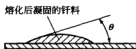
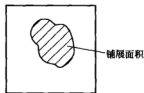
图 5.6 θ 测定

图 5.7 铺展面积示意图

θ 测定方法是切取金相试样,在金相显微镜下测定其大小, θ 越小,表明润湿性越好。铺展面积越大,钎料的润湿性越好。

(2) 钎料的流动性

通常用 1~2g 钎料,放置于如图 5.8 所示的 T 形试样上,两端用钨极氩弧焊定位,为避免间隙不均匀,可以采用金属丝捆扎固定的方法使钎焊间隙保持较小。模拟真空钎焊工艺,试样出炉后测量钎料的流动长度,据此判断钎料的流动性能。

(3) 钎料的填隙性能

通常用 1~2g 钎料,放置于如图 5.9 所示的不等间隙的 T 形试样一端,根据选定的工艺参数进行真空钎焊,试样出炉后在最大间隙处切取金相试样,在显微镜下测定钎缝宽度值,即为钎料的填隙性能。

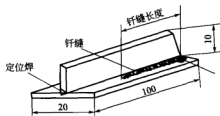


图 5.8 流动性能试样

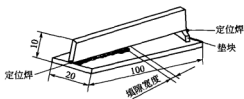


图 5.9 填隙性能试样

(4) 钎料流动温度的测定

通常用 1~2g 钎料，放置于厚度为 1~3mm、边长为 40mm×40mm 的平板上，在真空中高于钎料熔化温度后分段升温，并保持基本相同的工作真空度，通过观察孔观察试样上的钎料是否完全熔化并流动，记录此时的温度即为钎料的流动温度。试样出炉后，进一步观察并核实钎料的流动情况，当炉内、炉外观察结果相差较大时应重复试验。

(5) 钎料对母材的熔蚀性

熔蚀性试验可直接从图 5.8 或图 5.9 试样上切取不同部位的金相试样，在显微镜下测量钎料流布区边缘对母材造成的凹陷深度，来评定钎料熔蚀性的大小。如果采用上述方法结果不明显时，可采用以下方法。

将 1~2g 钎料，放置于厚度为 0.1mm、边长为 40mm×40mm 的平板试样上，模拟钎焊工艺过程，出炉后检查试样是否溶穿，以溶穿面积的大小来评定钎料的熔蚀性。

5.3 真空钎焊工艺

5.3.1 钎焊接头设计

(1) 接头设计原则

在真空钎焊生产中，与其他钎焊一样，基本上采用搭接接头和对接接头两种类型。此外，具有 T 形接头或角接特点的接头，可看做对接接头。但在具体结构中，需要真空钎焊连接的部件形状和位置是各式各样的，不可能全部符合典型的搭接接头和对接接头形式，为了提高接头的承载能力，在设计真空钎焊接头时，需要注意几个方面。

① 防止应力集中 一般母材本身能够承受较高的应力和运载负荷，因此，一个优良的钎焊件设计总是善于不使接头边缘产生任何过大的应力集中，而是设法将应力转移到母材中去。为此，不应把接头布置在焊件有形状或截面发生突变的部位，以避免应力集中；也不宜安排在刚度过大的地方，防止在接头中产生很大的内应力。异种材料进行真空钎焊时，先要计算不同材料在钎焊温度下的热膨胀，以验证与推荐的钎焊间隙是否一致，还要充分考虑整个构件受热所带来的不利因素。一般把热膨胀系数较大的材料设计在内部，而相对较小的设计在外部，以保证较小的接头间隙。如果两者的热膨胀系数相差悬殊，则会在接头中引起较大的内应力，甚至导致开裂破坏，这时，在接头设计中应该考虑采用适当的补偿垫片，借助它们在冷却过程中产生的塑性变形来消除部分应力。

在设计不同厚度的材料组成的接头时，为了避免在载荷作用下接头处产生应力集中，有时应考虑局部加厚薄件的接头部分。图 5.10 列举了几种在承受图示箭头方向的载荷时，接头的不同设计。

② 满足构件的工况要求 不同的构件使用要求和工况条件各异，设计接头时必须采取

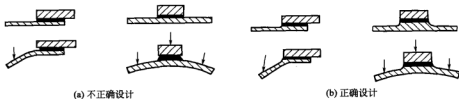


图 5.10 不同厚度焊件的接头设计示例

相应的措施。

对于要求承压密封的钎焊接头，只要可能，都应采用搭接形式，因为这种接头具有较大的钎焊面积，发生泄漏的可能性较小。图 5.11 所示为几种承压密封容器的典型钎焊接头。

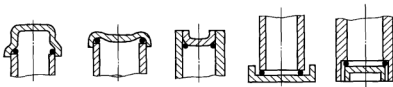


图 5.11 承压密封容器的典型钎焊接头

在导电接头的设计中，要考虑的主要因素是导电性。正确的接头设计不应使电路的电阻有明显增大。

③ 有利于钎料的合理放置 真空钎焊工艺中钎料是预先放置的，设计接头时，应考虑钎料的装填位置，需要在接头母材上开槽预置钎料，槽应开在截面较厚或易加工槽口的材料上，如图 5.12 所示。

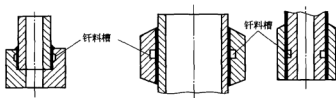


图 5.12 开钎料槽示意图

④ 便于检验 设计接头时，应考虑将钎料安放于组件的内侧，钎焊时钎料就会向外流出，检验者可以直接观察钎料的流布情况和整个接头的钎透情况。在一些情况下，钎料不能放置于接头中，为了保证使钎料适当地流入接头便于检验，钎料应放于接头的一侧，并能流入接头，这样就可以从接头的另外一侧检验钎料的流布情况。

⑤ 便于组件的定位与夹持 钎焊件装炉准备钎焊时，要求部件彼此之间能够保持正确的相对位置。接头设计时，在不影响组件结构性能的前提下，尽可能为组件自重定位和装配设计出凸台、凹槽及工艺台阶等。

⑥ 有利于控制和消除组件的变形 真空钎焊时，组件要整体受热，接头设计要充分考虑重、厚、大的部件应置于下方，以避免高温时重力引起的变形；同时设计要利于装配应力的释放。

(2) 接头间隙的控制

钎焊间隙是指在钎焊温度时焊件表面间的装配间隙。钎焊间隙的大小不仅在很大程度上

决定着钎焊接头的性能,而且也直接影响着钎焊工艺实施的难易情况。因此,正确地选定钎焊间隙值,应该是钎焊接头设计中的一项重要内容。

钎焊过程中,钎焊间隙的大小影响钎料的毛细填缝过程、钎料与母材相互作用的程度以及母材对钎缝合金层受力时塑性流动过程等。这些因素的共同结果,必然极大地影响钎焊接头的质量和性能,甚至直接决定着钎焊工艺的成败。

钎焊间隙太大,毛细作用减弱甚至消失,钎料难以填满接头间隙,钎料与母材的合金化作用降低,或者产生硬脆的金属间化合物相,导致接头的力学性能下降。尤其是对于如图 5.13 所示的两端开闕的接头,液态钎料与母材之间的表面张力小于钎料的重力时,钎料无法在间隙中自持而流失,无法形成钎缝。钎缝太小,会妨碍钎料填充,尤其对于共晶型或单元素钎料影响更大。

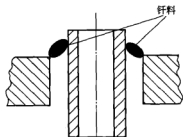


图 5.13 两端开闕钎料
易流失接头示意图

真空钎焊工艺过程是自动进行的,钎焊间隙的影响更大,要求在不妨碍钎料填充的前提下,接头间隙越小越好。保持较小的接头间隙不仅有利于钎料的流布,而且能使钎料凝固时形成的孔洞或缩孔减少,还有利于钎料与母材的合金化。更重要的是,处于狭窄间隙中的钎

料在受热发生塑性变形时,受周围母材的限制,接头中形成复杂的体应力,结果会使接头强度大大提高。

当使用 Ni-Cr-B-Si 系钎料钎焊奥氏体不锈钢或沉淀硬化类高温合金时,间隙越小,强度越高。“零”间隙时,钎缝强度与母材相近;当间隙大至 0.05mm 时,强度下降 30%~70%。图 5.14 和图 5.15 是用几种钎料钎焊奥氏体和马氏体不锈钢时,钎焊间隙与强度的关系曲线。可以看出,随着钎焊间隙的增大,接头强度下降非常明显,这就是用镍基钎料钎焊时,一定要设计成小间隙的原因。

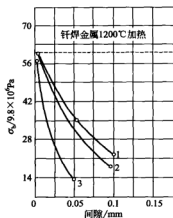


图 5.14 镍基钎料钎焊奥氏体不锈钢时
强度与间隙的关系

- 1—Cr14%, Si4.5%, B3.0%, Fe4.5%, 余 Ni;
2—Cr7%, Si4.5%, B3.0%, Fe3.0%, 余 Ni;
3—Cr19%, Si10%, 余 Ni

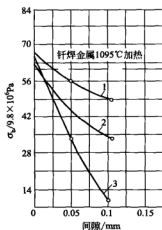


图 5.15 镍基钎料钎焊 1Cr13 钢时
强度与间隙的关系

- 1—Cr14%, Si4.5%, B3.0%, Fe4.5%, 余 Ni;
2—Cr7%, Si4.5%, B3.0%, Fe3.0%, 余 Ni;
3—Cr19%, Si10%, 余 Ni

表 5.6 列出了部分母材用不同钎料钎焊时, 钎焊间隙与接头的抗剪强度。

表 5.6 钎焊间隙与接头的抗剪强度

母材	钎料	钎焊间隙/mm	抗剪强度/MPa
碳钢及低合金钢	铜基钎料	0.00~0.05	100~150
	银基钎料	0.05~0.15	150~240
不锈钢	铜基钎料	0.03~0.20	370~500
	银基钎料	0.05~0.15	190~230
	锰基钎料	0.04~0.15	300
	镍基钎料	0.00~0.08	180~250
铜及铜合金	铜基钎料	0.02~0.15	170~190
	银基钎料	0.05~0.13	160~180
铝及铝合金	铝基钎料	0.1~0.3	60~100

在真空钎焊过程中, 最佳钎焊间隙是由多方面因素综合决定的。不可能通过某种原理或公式来确定。在设计过程中, 应结合具体材料、接头构造和钎焊工艺等, 参照生产实践经验来确定钎焊间隙。

5.3.2 钎焊前清理和表面准备

真空钎焊工艺与其他钎焊方法类似, 包括钎焊前焊件的表面清理与制备、焊件的装配与定位、钎料的选择、钎焊工艺参数的确定、钎焊后的处理等工序。由于真空钎焊是一种自动焊工艺, 这对焊件在入炉前的准备工作提出了较高的要求。如果焊件入炉前的准备工作不当, 可能会导致钎焊失败。在钎焊之前焊件的存放与加工过程中, 焊件的表面不可避免地覆盖上氧化物、油脂或灰尘等, 它们都会妨碍液态钎料在母材上的铺展填缝。因此真空钎焊前焊件的表面制备主要针对表面的油污和氧化物。此外对于某些特殊结构的组件或一些非金属材料, 为了保证钎焊质量, 还要对钎焊面作镀覆金属层处理。

(1) 除油

真空钎焊工艺对焊件表面的除油要求十分严格, 即使有很光洁的表面, 如果存在油污进行真空钎焊, 这些油污经过加热仍停留在焊件的表面, 阻碍液态钎料对母材的润湿铺展和良好的钎缝成形。目前, 钎焊件的除油主要有以下几种方法。

① 有机溶剂除油 溶剂除油是指用汽油、煤油、三氯乙烯、四氯化碳、酒精等溶剂溶解油脂, 去除焊件表面的油污。由于汽油溶油能力强、价廉、毒性小、使用方便, 所以生产中多使用汽油。除油方法是直接将焊件放置在溶剂中浸渍, 并用毛刷刷洗。对于油封焊件, 要先用煤油自封后, 再用溶剂清洗。真空钎焊焊件只用汽油除油是不够的, 通常还要用酒精进行彻底除油及清洗, 才能准许进炉。

② 化学除油 利用化学溶剂的皂化或乳化作用, 将焊件表面的油污去除的方法, 属于化学除油。一般是使用碱或碱性盐类的水溶液将焊件浸洗除油, 具有过程简单、成本低及效果好等优点。其缺点是溶液要求加热、用后难以再生及对某些金属具有腐蚀作用。

对于常用的钢铁焊件, 可使用: NaOH 30~50g/L、 Na_2CO_3 20~30g/L、 $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 50~70g/L、 Na_2SiO_3 10~15g/L。溶液温度 80~100℃, 浸洗时间 20~40min。

对于铝及铝合金焊件, 可使用: Na_2CO_3 15~20g/L、 $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 10~20g/L、 Na_2SiO_3 10~15g/L、OP-10 (烷基酚与环氧乙烷的缩合物, 属于非离子型表面活性剂) 乳化剂 1~3g/L。溶液温度 60~80℃, 浸洗时间 3~5min。

对于铜及铜合金焊件, 可使用: NaOH 10~15g/L、 Na_2CO_3 20~50g/L、 $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 50~70g/L、 Na_2SiO_3 5~10g/L、OP-10 乳化剂 50~70g/L。溶液温度 70~90℃, 浸洗时间 20~30min。

③ 电解除油 电解除油采用直流电, 焊件作为电源的一极放入电解槽。按焊件所处境性的不同, 电解除油可分为阴极除油、阳极除油和混合除油。与阳极除油相比, 阴极除油的速度要快得多。但是, 对碳钢焊件不宜采用阴极除油, 以防止引起渗氢而降低塑性。电解除油与化学除油相比, 加速了除油过程, 减少了溶液的消耗。但是, 对于形状复杂的焊件, 电解除油不够有效。

④ 三氯乙烯蒸气除油 三氯乙烯 (C_2HCl_3) 是一种高效溶剂, 在室温下的溶油能力是汽油的 4 倍, 在 50℃ 以上是汽油的 7 倍。蒸气除油是把要除油的焊件置于三氯乙烯的蒸气中, 借蒸气与冷的焊件接触时凝聚形成的液体溶解焊件上的油污。由于焊件始终与干净的三氯乙烯接触, 不会造成焊件的污染, 除油效果好, 速度快, 废液又可以通过蒸馏回收, 是一种高效、经济的除油方法。

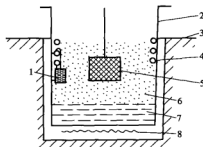


图 5.16 三氯乙烯蒸气除油示意图

1—清洁的三氯乙烯; 2—槽; 3—地平面;
4—冷却水管; 5—料筐; 6—三氯乙烯蒸气;
7—液态三氯乙烯; 8—加热装置

蒸气除油的工作原理如图 5.16 所示。由槽、加热体和冷却管等组成。液态三氯乙烯置于槽底, 使用时加热至 87℃ 即蒸发。由于蒸气密度比空气大, 积聚于槽的底部。随着蒸气量的增加, 蒸气逐渐上升。为了防止蒸气溢出, 槽要高出地平面, 在槽内低于地平面的位置环绕多圈冷却水管。当蒸气上升至水管处, 被冷却凝结为液体重新流至槽底, 保证了槽内蒸气

气面始终处于地平面以下。

三氯乙烯蒸气除油的操作程序如下。

- 将带有油污的焊件先用煤油洗净, 再用压缩空气吹干。
- 将焊件放入料筐内, 放置的位置应便于油污的流出。将料筐放入三氯乙烯蒸气中。
- 每隔 3~5min 将料筐提出蒸气外, 待冷却后再放入蒸气中, 如此反复至少三次。
- 除油时间一般为 10~15min, 最多不能超过 30min, 将料筐提出, 滴干焊件上的溶液后, 取出零件。
- 如果除油不彻底, 可待焊件冷却后, 再次重复进行除油。

操作时要注意零件上不能有水份; 不能沾有强碱性物质; 不能带有橡胶件; 对钛合金零件, 要在溶液里加一定量的缓蚀剂; 带有凹槽、内孔等不易彻底除油的零件, 在蒸气除油后应放入干净的热溶液中洗涤。另外, 钎料 (丝、片状) 的除油可与焊件同筐进行。

(2) 清除氧化膜

进行真空钎焊的部件, 一般都是经过精加工的, 表面很少存在较厚的氧化膜, 但仍可能存在一层氧化膜, 钎焊件入炉前一定要除去这层氧化物。去除氧化物的方法如下。

① 机械清除 去除焊件表面氧化物或锈蚀最简单的方法是机械清除。可采用锉刀、刮刀和纱布打磨, 但生产效率低, 只适于小件的单件生产; 用金属丝刷、金属丝轮和砂轮处理, 效率较高, 适于小批量生产; 对形状复杂或表面积大的焊件, 可采用喷砂或喷丸处理, 效率最高, 但是一般用于钢、钛及钛合金。喷砂后的焊件, 还应作去除砂粒的补充处理。用纱布打磨后的焊件表面, 也须用浸有有机溶剂的布料擦净砂粒。

机械清除氧化物时, 应使焊件表面适当粗糙化, 以促进钎料的铺展, 但要注意粗糙度

适当。

② 物理清除 主要是超声波清理法。其原理是依靠超声波在液体介质中传播时,液体内部产生空化作用,除去金属表面的氧化膜。对于不锈钢或高温合金,通常使用的介质是丙酮、酒精、三氯乙烷、汽油或蒸馏水;超声波频率为 $2 \times 10^4 \text{ Hz}$;清洗时间一般不超过 30min。超声波清洗时,焊件不能重叠放置,清洗件要全部浸入介质溶液中,保证污物易于流出。

③ 化学清除 化学清理是以酸和碱能够溶解某些氧化物为基础的。通常生产中使用的有硫酸、盐酸、硝酸、氢氟酸及其混合物的水溶液以及氢氧化钠的水溶液等。对于不同的材料,由于表面氧化膜不同,使用的清洗液也各不相同。

a. 奥氏体不锈钢和高温镍基变形合金的清洗 常使用的溶液有: I—NaOH 75%~83%、 NaNO_3 17%~25%,溶液温度 $(60 \pm 5)^\circ\text{C}$, 浸蚀时间 20~30min; II—NaOH 100~125g/L、 NaNO_3 100~125g/L、 KMnO_4 50~100g/L,溶液温度 $(100 \pm 5)^\circ\text{C}$, 浸蚀时间 60min。

b. 铝及铝合金的清洗 一般使用的溶液有: I—NaOH 20~35g/L、 Na_2CO_3 20~30g/L,其余为水,溶液温度 $40 \sim 55^\circ\text{C}$, 浸蚀时间 2min; II—NaOH 10%、 H_2O 90%,溶液温度 $20 \sim 40^\circ\text{C}$, 浸蚀时间 2~4min; III— Cr_2O_3 150g/L、 H_2SO_4 30g/L,其余为水,溶液温度 $50 \sim 60^\circ\text{C}$, 浸蚀时间 5~20min; IV—NaOH 50g/L、 Na_2CO_3 50g/L、 Na_3PO_4 50g/L、 Na_2SiO_3 50g/L,其余为水,溶液温度 $70 \sim 80^\circ\text{C}$, 浸蚀时间 0.5~1min。

浸蚀后将焊件在热水中冲洗,放入 15%的 HNO_3 溶液中光泽处理 2~5min,再在流动的冷水中冲洗,并在温度不低于 60°C 的条件下干燥。

c. 高温镍基铸造合金清洗 对于铝、钛含量比较高的镍基铸造合金,表面氧化膜十分稳定,除用超声波清洗之外,还应在葡萄糖酸钠与氢氧化钠的溶液中清洗。具体方法如下。

- 将 30%的溶液盛在容器内,在电炉或其他加热器上加热至 100°C 。
- 焊件放入沸腾的溶液中 3~5min。
- 取出零件,用流动的自来水冲洗。
- 室温下在 25%的硝酸溶液中清洗 5min。
- 用流动的自来水冲洗干净。
- 用热吹风机吹干表面的水珠,并在 $180 \sim 250^\circ\text{C}$ 干燥箱中干燥 20~30min。

(3) 零件表面预处理

钎焊前对零件的表面处理是一项特殊的工艺措施。一般是基于简化钎焊工艺或改善钎焊质量的要求,但在有些情况下,却是实现钎焊连接的根本途径。

从焊件表面的预涂覆层功能可分三类,即工艺镀层、防护镀层和钎料镀层。这三类镀层的应用条件和具体功能各不相同。

工艺镀层主要用于改善或简化钎焊工艺条件,因此,可以用于氧化性较强的母材,保护它不被氧化,使之能在较低的工艺条件下获得质量良好的接头;工艺镀层还用于较难或不能为钎料润湿的母材,如异种金属钎焊中润湿性差的一方以及非金属材料,以改善钎料对其的润湿,保证钎焊过程顺利进行。焊件上的工艺镀层在钎焊过程中应能全部被钎料溶解,以获得较高的结合强度。

防护镀层的作用在于抑制钎焊过程中可能发生的某些有害反应,例如在钎料作用下母材的自裂、钎料与母材反应生成脆性相以及母材成分和性能的变化。为了起到防护作用,要求镀层能被液态钎料很好地润湿,但不被溶解。

钎料镀层的直接作用是作为钎料,但其更重要的用途是减少钎缝的缺陷、提高致密性,

以保证高度的气密性，或在大面积、多钎缝结构的生产中简化工艺、保证钎焊质量并提高生产率。钎料镀层一般是全成分的钎料，有时也可能是钎料的一种组元，靠加热过程中与母材反应生成钎料。扩散钎焊铜及铜合金时，在零件表面镀银获得银铜共晶钎缝即为一例。

为了保证钎焊过程的顺利进行和接头质量，必须做好钎焊前焊件的表面处理工作，对于经过除油、除氧化膜或预镀覆等表面制备后的焊件，应妥善保存，避免再次污染。

5.3.3 焊件的装配与定位

经过表面预制备的焊件在实施钎焊前应按图样进行组装，使各个部件之间保持正确的相互位置，获得设计所要求的钎焊间隙并保证焊件的总体尺寸。为防止焊件在钎焊过程中发生错动，装配时应采用适当的方法把焊件固定在相应的位置，以顺利实现钎焊工艺、获得质量可靠的钎焊结构。

用以固定焊件的方法有很多，应根据焊件的结构、技术要求、钎焊方法及生产类型等选用。下面是几种常用的装配定位方法。

(1) 自重定位

一般来讲，在钎焊热循环中，只要能保证焊件相对位置，装配定位的方法越简单越好。

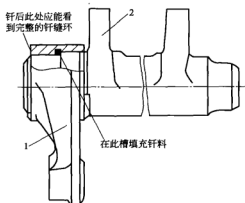


图 5.17 紧配合定位

1—支架；2—柱管

对于平面接头的焊件，可以利用焊件本身的重量实现定位。

(2) 紧配合定位

炉中钎焊要求装配间隙小，一般装配后即可保持相对位置。图 5.17 是利用冷热紧密配合实现定位的。首先将柱管在液氮中冷却 30min，使其收缩，同时把支架在炉中加热至 250℃，使其膨胀；趁热在压力机上把柱管压入支架中。

利用焊件之间的尺寸公差也可实现紧配合定位，虽然简单可靠，但却不能保证钎缝间隙，所以一般不予采用。

(3) 毛刺定位

利用冲头在焊件配合面上适当位置处扩冲点，靠冲点周围突起的金属毛刺实现定位，主要用于小型部件没有定位凸台、槽孔的组件，最适合旋转件的预组合定位。

毛刺定位的方法是：在图 5.18(a) 所示带孔的零件上，沿内孔圆周顶部均匀打 3~5 个冲点，然后在插入件 [图 5.18(b)] 的下部沿圆周均匀打 3~5 个冲点，把销子或管子插入带孔件中，如图 5.18(c) 所示。突出的毛刺既起到了定位作用，又能保证均匀地钎焊间隙。

如果插入件两端都要装入带孔的零件，如图 5.19 所示，可先在插入件的 B 端打冲点，

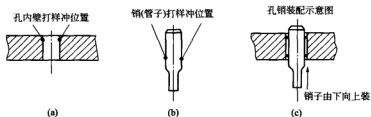


图 5.18 毛刺定位打冲点方法

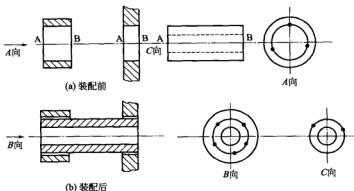


图 5.19 两端插入件的定位

A 端不打冲点，而在孔 A 端内孔打冲点。

对于薄壁插入件（如管子），不宜在钎焊面上打定位冲点，以免管子变形。可在插入管子后，沿外结合线圆周打几个冲点即可。

(4) 焊点定位

通常对装配之后处于亚稳态的零件，采用熔焊的方法进行定位。最常用的是钨极氩弧焊定位，不加焊丝，只要把两连接零件金属熔化成焊点即可。这种方式的最大缺点是在接缝上形成焊点，把装配间隙固定了。对于原先设计，将热膨胀系数大的工件放在热膨胀系数小的工件内部的管接头组件，会影响其钎焊间隙。一定需要熔焊定位时，焊点分布要均匀，减小装配应力，且焊点不许氧化，以免阻碍钎料的流入。图 5.20 所示为两端管子与法兰连接，并且有一定的装配角度要求，一般非刚性定位很难精确保证装配角度。

对于难熔金属或者用氩弧焊难以定位的精密构件，可用激光焊或电子束焊定位；对于平板接头，如果相对位置要求严格，也可采用电阻焊定位。

(5) 夹具定位

对于结构复杂、生产量较大的焊件，主要的装配定位方法是使用夹具。它具有装配固定精确可靠、效率高的优点，但夹具本身成本较高，钎焊夹具与其他夹具相比，整体受热，工作条件恶劣。因此，设计真空钎焊夹具应注意：夹具材料

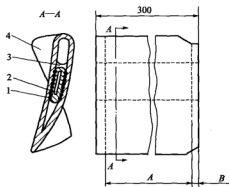


图 5.20 焊点刚性定位示意图
1—定位焊点；2—暖气管；3—钎缝；4—叶片
A—最小的钎焊长度；B—定位焊区域

应具有良好的导热性、高温强度、抗氧化性、抗腐蚀性和耐热疲劳强度；应与焊件材料有相近的热膨胀系数；在高温下不与焊件材料发生反应。在 1000℃ 以下钎焊的夹具材料推荐使用石墨、各类不锈钢或高温合金；1000~1600℃ 之间钎焊选用难熔金属及其合金、陶瓷、碳化物或硼化物以及有难熔涂层的石墨材料。夹具结构应具有足够的刚度，经反复使用不变形或少变形，结构尽可能简单，热容量要小，使之工作可靠，热应力小，又能保证较高的钎焊加热效率；避免使用螺栓或螺钉，因为在加热过程中螺栓或螺钉容易松动，造成焊件装配的不可靠；大型或复杂的夹具投入使用前应先使夹具经受模拟的钎焊循环，以保证尺寸的稳定

性和消除应力。另外,合理的夹具应当自身重量轻,能反复使用,并且有利于钎料的流动。

5.3.4 钎焊工艺参数的选择

真空钎焊的工艺参数主要有真空度、加热速率、稳定温度及时间、钎焊温度、钎焊保温时间、冷却速率、出炉温度等。它们都直接影响钎料填缝和钎料与母材的相互作用过程,对钎焊接头质量具有决定性的作用。

(1) 真空度

真空度的选择根据有母材种类、钎料类型、钎焊面积大小、是否使用夹具以及在整个钎焊周期中气体从母材中排除的程度等。

冷态真空度,是为了防止被钎焊件及炉内元件(如加热电阻丝、辐射屏等)的氧化,避免热气流直接通过机械泵以获得高的抽气效率,在加热之前应预先先把炉腔抽到所要求的真空度,冷态真空度的选择主要根据母材的种类,参考数据如表 5.7 所示。

表 5.7 冷态真空度的选择

序号	母材	冷态真空度/Pa
1	铝及铝合金	$10^{-2} \sim 10^{-3}$
2	铜及铜合金	$5 \times 10^{-1} \sim 5 \times 10^{-2}$
3	钛及钛合金	$10^{-2} \sim 5 \times 10^{-3}$
4	碳钢、低合金钢、合金结构钢、工具钢	$10^{-1} \sim 10^{-2}$
5	不锈钢	$5 \times 10^{-2} \sim 8 \times 10^{-3}$
6	高温合金	$10^{-2} \sim 10^{-3}$
7	非金属及电真空器件	$10^{-3} \sim 5 \times 10^{-4}$
8	硬质合金、难熔金属及碳化物	$10^{-2} \sim 10^{-3}$
9	精密合金及磁性材料	$10^{-2} \sim 5 \times 10^{-3}$
10	陶瓷、石墨、金刚石	$10^{-3} \sim 5 \times 10^{-4}$

热态真空度又称工作真空度,是指从开始加热到填气冷却这段时间的炉内真空度。由于加热时,焊件、夹具要析出气体,使用膏状钎料时黏结剂挥发等因素,会不同程度地引起冷态真空度的降低。但是在钎焊温度下,要求炉内真空度基本恢复到冷态真空度,通常是采用适当延长稳定时间的方法来实现。如果钎料中含有蒸气压较高的合金元素,为了防止合金元素大量挥发而污染炉膛,这时热态真空度与冷态真空度相差较大。例如在用铜基钎料时,因为铜在 940℃ 的蒸气压为 1Pa,所以在 940℃ 以上不允许把炉内压力降至 1Pa 以下,否则随着温度的进一步升高,会出现铜的大量挥发,造成以下结果。

① 蒸发的元素污染焊件表面,可能将不需要连接但相互配合的焊件或夹具结合起来。

② 过量蒸发会使工件表面粗糙,或使钎缝出现空穴缺陷,并改变金属的原有性能。

③ 蒸发物附着、沉积在炉内元件上,会造成炉内电气绝缘降低或短路等事故。为了克服这种现象,降低热态真空度,可向炉内通入纯度高、露点低的惰性气体,如氩、氮等,将炉内压力调节到安全程度。表 5.8 是根据使用钎料类别所推荐的工作真空度。

表 5.8 用不同钎料钎焊时的工作真空度

钎料类型	真空度/Pa	钎料类型	真空度/Pa
铝基钎料	$5 \times 10^{-3} \sim 10^{-3}$	金、钼、镍、铂基钎料	$10^{-2} \sim 5 \times 10^{-3}$
铜基钎料	2~5	钛基钎料	$5 \times 10^{-3} \sim 10^{-3}$
银基钎料	$5 \times 10^{-1} \sim 10^{-1}$	钨基钎料	$1 \sim 10^{-1}$

(2) 加热速率

钎焊加热速率应能保证焊件析出的气体被充分抽出,同时要使组件受热均匀,以减少或防止组件骤热产生的应力而引起变形。确定加热速率应考虑的主要因素如下。

① 组件的材料、形状、结构和尺寸。对于铜及铜合金,要在 250~500℃ 之间以较快的速率加热;对于沉淀硬化类耐热合金或奥氏体不锈钢,要在其碳化物析出危险温度区内迅速加热;对于形状复杂及装配预应力较大的构件,要缓慢加热;对于厚大的部件,加热速率不宜过快。

② 使用钎料的类型及其结晶温度范围。对于纯金属钎料,不论形状如何,加热速率可以快些;当使用合金钎料时,在熔化温度范围内要较快加热,以免钎料偏析而使液相线温度提高;当使用膏状钎料时,在 500℃ 以下加热速率应该慢些,以免黏结剂剧烈挥发而引起钎料飞溅。但是不论使用何种钎料,在钎料固相线温度以下 50~100℃ 范围内,加热速率不宜过快,以保证钎料熔化时组件内外温度基本一致,使毛细作用能很好地发挥。当使用固、液相线间隔较宽的钎料时,加热到熔融状态,停留时间过长会使液相从固相中分离出来,为防止和避免这种状况发生,在此阶段内应使加热速率尽可能快些。在钎焊薄壁焊件时,为了防止母材金属被钎料蚀蚀,在控制产生变形的前提下,加热速率也应尽可能快些。表 5.9 列出了常用金属组件真空钎焊时推荐的加热速率。

表 5.9 常用金属组件真空钎焊时推荐的加热速率

℃/min

金属组件		中小较薄组件、低应力装配		大厚组件、高应力装配	
		不含黏结剂钎料	含黏结剂钎料	不含黏结剂钎料	含黏结剂钎料
铝及铝合金		6~8	4~5	4~5	3~4
铜及铜合金		5~10	5~6	5~8	5~6
钛及钛合金		6~8	5~6	6~7	4~6
碳钢及合金结构钢		10~15	6~8	8~12	6~8
不锈钢	沉淀硬化	8~15	5~6	5~7	5~6
	非沉淀硬化	6~10	6~8	5~6	4~5
高温合金	沉淀硬化	8~10	5~6	6~8	5~6
	非沉淀硬化	6~8	4~5	5~7	4~5
硬质合金及难熔金属		10~18	5~6	10~12	5~6
陶瓷、金刚石、石墨		12~20	5~6	10~15	5~6

(3) 稳定温度和保持时间

稳定温度和保持时间是指钎焊时加热到接近钎料固相线附近的温度,并在此暂停加热、保持这一温度一定时间。其目的是减小组件的温度梯度,使组件各部分的温度得以均匀。在钎焊不锈钢、耐热合金等导热性较差的组件时,如果一直把炉温从室温加热到钎焊温度,就会在组件各部位内外层之间造成较大的温度差。此温差大小与组件材料种类、结构和壁厚有关。这时,外层钎料熔化后即沿着较高温度带流散;而接缝内由于温度较低,不可能得到良好的填充。虽然随后还要在钎焊温度下保温,但因钎料已有流失,无法继续填充,必然造成未钎透等缺陷,降低接头质量。因此,必须根据组件的具体情况,正确地选择稳定温度和保持时间。

(4) 钎焊温度

钎焊温度是钎焊过程中最主要的工艺参数之一。在钎焊温度下,一方面,要钎料熔化,

在毛细作用下填满接头间隙,并与母材进行冶金作用;另一方面,能够完成母材的热处理程序中的某一工序,如淬火、固溶处理等,提高钎焊接头的性能。

确定钎焊温度的主要依据首先是所选用的钎料的熔点。钎焊温度应适当地高于钎料熔点,以减小液态钎料的表面张力,改善润湿和填缝,并使钎料与母材能充分相互作用,有利于提高接头强度。但钎焊温度过高却是有害的,它可能引起钎料中低沸点组元的蒸发,母材晶粒的长大以及钎料与母材过分地相互作用而导致熔蚀、晶间渗入等,使接头强度下降。因此,通常将钎焊温度选为高于钎料液相温度线 $30\sim 100^{\circ}\text{C}$ 效果较好。但不同的钎料,需要高出其熔点的温度范围也不同。钎料的结晶温度范围越大,钎焊温度高出钎料熔点应越多。对于单元素钎料,只要高出熔点 $30\sim 70^{\circ}\text{C}$,即可使钎料的流动性处于最佳状态;对于多元合金的钎料,则钎焊温度必须高出液相线 $60\sim 120^{\circ}\text{C}$,才能使钎料处于最佳的流动状态。

在钎焊温度下,应使母材充分固溶,完成其固溶处理,既节约了工时,又避免了焊后固溶处理引起的不良后果,这是炉中钎焊,特别是真空钎焊选择钎焊温度时应当考虑的一个问题。各种材料的固溶处理温度不同,钎焊温度应根据材料的热处理规范来选择,以使钎焊和热处理工序在同一加热冷却循环中完成。

(5) 保温时间

钎焊保温时间是钎料填充间隙和控制合金化作用的重要阶段,对于接头强度的影响与钎焊温度具有类似的特性。一定的保温时间是钎料同母材相互扩散、形成牢固的结合所必需的。但过长的保温时间同样会导致某些过程的过分发展而走向反面。

选择钎焊保温时间主要决定于钎料与母材的相互作用特性。当钎料与母材具有强烈溶解、生成脆性相、引起晶间渗入等不利倾向的相互作用时,要尽量缩短钎焊保温时间。相反,如果通过两者的相互作用能消除钎缝中的脆性相或低熔点组织时,则应适当延长钎焊保温时间。

钎焊保温时间还与焊件大小、厚度和钎焊间隙有关。大厚件的保温时间应比小、薄件的长,以保证加热均匀。钎焊间隙大时,为了保证钎料同母材必要的相互作用,应有较长的钎焊保温时间。有些组件的厚度并不很大,但钎焊接头被部分地或全部遮蔽,不能直接受到辐射加热,应适当延长保温时间,尽可能缩小被加热工件的表里温差。

此外,也应当考虑母材的热处理要求。例如,奥氏体不锈钢,当加热至 900°C 以上时,碳化物很快固溶,钎焊保温时间不需太长。马氏体不锈钢则需要充分固溶后,才能在随后的淬火时得到完全马氏体,所以钎焊保温时间要相应长一些。耐热合金则必须使合金元素充分固溶后才能为固溶强化、弥散强化提供条件,因此其钎焊保温时间应当更长一些。

应当指出,对钎焊温度和钎焊保温时间不应孤立地来确定,它们之间存在着一定的互补关系,可以相应地在一定范围内变化。因此选择时要根据上述原则通过试验进行确定。

(6) 冷却速率

焊件的冷却虽是在钎焊保温结束后进行的,但冷却速率对接头质量也有很大的影响。过慢的冷却可能引起母材晶粒长大、强化相析出或出现残余奥氏体等。加快冷却速率,有利于细化钎缝组织、减小枝晶偏析,从而提高接头强度。但是过高的冷却速率,可能使焊件形成过大的热应力而产生裂纹,或因钎缝迅速凝固、气体来不及逸出形成气孔。具体确定时,必须结合焊件的尺寸、母材的种类和钎料特性等因素。

(7) 出炉温度

焊件在较高的温度下出炉,会引起表面氧化,特别是使用风扇冷却时,组件表面温度较低,停炉后由于组件内部的温度高,会使整个焊件的温度回升。因此出炉温度应比额定值低些,这根据母材的种类而定。一般不锈钢及耐热合金为 150°C 以下;铝及铝合金为 300°C 以

下;碳素钢及合金结构钢为100℃以下。

5.3.5 真空扩散钎焊

真空扩散钎焊是在焊件钎焊面预置钎料,或借接触反应形成的液相作为钎料,在真空中,将焊件在高于钎料固相线温度下持久加热,使钎料成分与母材相互充分扩散,以获得性能优异的均质钎缝的一种钎焊工艺。这种连接工艺不仅解决了钛及钛合金、高温合金、难熔金属、石墨、陶瓷等材料的高强度连接难题,而且可以满足大平面或难以施加钎料的精密构件、高应力接头等特殊接头的要求,是一种工艺适应性强、效率高的连接方法。

(1) 真空扩散钎焊的特点

真空扩散钎焊的形成机理实质上是钎缝金属的等温凝固过程,即在钎焊加热保温过程中,间隙中的钎料与母材发生冶金反应,形成不同的低熔点共晶,这些低熔点组元不断扩散或逐渐反应消失,使液相组织的固相线不断升高,当超过钎焊温度时,间隙中的液相凝固为固相,从而形成钎缝。

真空扩散钎焊分为两大类。一类是不加钎料,直接利用母材之间化学成分的不同,预先将接头压合,然后加热,使之相互发生共晶反应,而在钎焊温度下随保温时间的持续,共晶成分扩散,液态变固态,形成冶金结合的钎缝。电子工业中银与铜的扩散钎焊是这一类的典型代表。第二类是需要将钎缝内预置钎料或采用喷涂、蒸发、溅射、电镀等方法向接头施加扩散金属或合金,加热使之处于液相后长时间扩散,使钎缝金属由液相变固相,随之继续延长保温时间,能够完全或局部消除钎料层,得到显微组织、成分、性能等与母材相近的钎焊接头。

扩散钎焊的特征是把钎焊的简易与扩散焊的高质量结合起来,它与真空钎焊的主要区别是:在钎焊温度下保温时间长;钎缝在平衡状态下结晶;不需要降温即可形成接头;钎缝组织均匀,多为单相;无明显的钎料层。它与扩散焊的主要区别是:连接温度低;不需加压或用夹具稍加压力即可;可以加速扩散过程,促进基体金属原子的结合和相互作用;可以降低对连接表面的制备要求;钎缝具有接近母材成分和性能的特点。

真空扩散钎焊只有在钎焊间隙很小(0.02~0.05mm)的情况下,才能保证钎焊接头强度。当间隙值为0.02mm时,接头强度最高。间隙过大,钎缝中的脆性相难以消除。

(2) 真空扩散钎焊用钎料

真空扩散钎焊时,钎料起着决定性作用。与一般的钎焊方法相比,扩散钎焊用钎料应该满足两个特殊要求:一是含有一定量能够降低钎料熔点的降熔元素,这些元素在扩散钎焊过程中又非常容易地扩散到母材中被母材溶解;二是降熔元素扩散或被溶解后,钎料的强度和性能应能满足设计和使用要求。

扩散钎焊用钎料多为箔状,非晶态镍、钴基钎料箔是最理想的一类,一般很薄(20~30 μm),能保证两焊件钎焊面贴紧,有利于钎料组元向母材中扩散,钎料量能严格控制。另外,也可使用粘带钎料。

根据母材种类不同,钎料类型也较多。目前扩散钎焊多用于高温合金、难熔金属等,故所用钎料多为镍基、钴基、钛基、钨基、铜基等。

BNi80CrSiBCo钎料主要用于高温合金、石墨或难熔金属的真空扩散钎焊。用于镍基铸造高温合金时,接头室温强度 $\sigma_b > 500\text{MPa}$, $\tau > 400\text{MPa}$;900℃时 $\sigma_b > 200\text{MPa}$,接头重熔温度 $> 1230^\circ\text{C}$ 。

BNi78CrMoB钎料和BNi82CrB钎料均广泛用于使用温度超过1000℃的高温合金的真空扩散钎焊。

BCo47CrNiSiW钎料主要用于钴基高温合金的真空扩散钎焊,接头耐温高于1000℃。

BTi70CuNi 钎料主要用于钛及钛合金、陶瓷与钢、陶瓷与难熔金属的真空扩散钎焊。接头的抗剪强度可达 150~550MPa; 使用温度高于 500℃, 钎缝抗腐蚀性强。

BNi66MnSiCu 钎料是真空扩散钎焊中使用较为广泛的一种钎料, 其中锰受热后会从钎料系统离析, 使钎料熔化温度升高, 钎料重熔温度大于 1200℃, 主要用于钎焊镍基高温合金及纯镍与石墨或陶瓷的异种材料钎焊接头, 获得的接头可在 650~815℃之间长期使用。

为了得到韧性好的钎缝, 通常希望钎料中所含脆性化合物形成元素尽量少; 而为使合金具有更好的工艺性能以适应焊接技术要求, 希望钎料合金中含有足够多的降熔元素。在一些特殊情况下, 两个方面是相互矛盾的, 可通过大量的试验得到能够较好地协调这种矛盾的钎料成分。例如采用含 Si 钎料真空条件下扩散钎焊 GH188 钴基耐热合金时, Si 元素作为降熔元素必不可少, 然而它又能与母材反应形成脆性的硅化物, 这种情况下, 只能通过试验改进钎料的合金成分。

真空扩散钎焊时降熔元素在焊接温度下的扩散行为, 包括扩散速度、扩散距离等, 影响焊缝的均质化。降熔元素扩散速度较慢、扩散距离较短时, 容易造成降熔元素不能充分固溶在焊缝中, 导致元素偏析, 降低接头的性能, 这时, 应该适当提高扩散钎焊温度或适当延长保温时间, 使降熔元素能够充分固溶到焊缝组织中, 实现焊缝的均匀化。

降熔元素在母材金属中的固溶度以及是否容易形成脆性金属间化合物等, 都会直接影响焊缝的性能。降熔元素在母材中的固溶度较小时, 应考虑适当减少中间层合金中降熔元素的含量, 以免造成元素的局部富集, 导致偏析; 如果降熔元素容易与母材元素形成脆性的金属间化合物, 则易导致焊缝中出现脆性相导致焊缝性能下降, 但若降熔元素含量过低, 则会引起焊接温度的提高, 钎料工艺性变差。

(3) 真空扩散钎焊工艺

① 表面制备 焊件的表面制备与真空钎焊工艺大致相同。

② 装配定位 装配定位尽可能采用自重定位或夹具定位, 应保证两工件的紧密配合。当间隙小于 0.25mm 时, 表现规律与真空钎焊相同, 间隙越小, 获得接头质量越高。

③ 工艺参数的选择

a. 真空度可比真空钎焊低 0.5~1 个数量级, 因为装配紧密, 不容易受到氧化或不纯气氛的侵入。

b. 加热速率可适当快些, 不会形成钎料飞溅, 并可避免合金元素的偏析。

c. 扩散钎焊温度通常可比真空钎焊温度稍低, 最佳选择是与扩散时间匹配。

d. 扩散钎焊时间应保证降熔元素或有意加入的元素来得及扩散和溶解, 即完成等温凝固过程。在间隙不变、温度相同的条件下, 不同扩散时间对钎缝组织的影响十分明显。

e. 在等温凝固结束后, 可以直接选用充惰性气体、用风扇搅拌冷却, 不考虑气流对钎缝成形的影响。

5.4 真空钎焊质量控制

真空钎焊接头质量直接影响产品的安全使用性能。为此, 应正确地选择合适的质量检验方法, 而且熟悉常见缺陷的形态、形成原因、影响因素和防治措施等。良好的接头质量是由严格地遵守规定工艺和从原始材料、毛坯的检验开始直到最终成品的试验为止, 通过全面的生产检验得到保证。在全部生产过程中, 某一环节出现偏差, 都有可能在钎缝、接头和结构内形成缺陷, 降低产品的性能。

5.4.1 影响钎缝质量的因素

(1) 零件清洁度

① 手汗污染 焊件不仅在钎焊前要进行必要而严格的除油和去除氧化膜,而且还应该重视在其后的装配工序中不允许重新污染。实践中有时除油工序进行得很仔细,但操作者在装配零件时,直接用手接触,尤其是在夏季,手汗多,危害大。因为手汗中含有盐类乳酸,残留在工件上,高温时会对零件产生腐蚀作用,特别是对镍基合金或钛合金危害更大。

② 低熔点金属污染 装配除铝及铝合金之外的其他焊件时,严禁用铝质或铜质锤敲打,避免铝、铜对被钎焊金属的污染。另外残留在接缝上的铝会降低钎料的润湿性,妨碍钎料铺展。

③ 炉腔对工件的污染 当使用铜基钎料钎焊焊件时,即使是使用高纯度氩气调节炉内压力,抑制铜的挥发,但还是会有一定的铜挥发,吸附在炉腔内壁,会在下次热循环和低压力作用下重新挥发,而吸附在工件上。这样对于镍基高温合金可能会引起熔蚀;对于铝及其合金也是有害的。所以,为避免这种污染,必须对真空炉进行真空净化处理,使污染在炉壁上的低熔点合金再次挥发并被泵抽走。

(2) 设备泄漏率

生产实践中常发现,钎焊时即使真空度不低,但出炉后焊件却明显氧化。这除了与冷却气体的纯度有关外,主要是由于设备的泄漏率所引起的,如图 5.21 所示。当设备的漏气率大大小于抽气速率时,设备仍然能获得工艺要求的真空度,但焊件并非处在仪表指示的真实的真空气氛中,而是处于一个不断受到空气侵袭的气氛中,即微量空气进入真空室后立即被泵抽走,使钎焊循环处于进气与抽气的动态平衡。这虽然延长了抽气时间,由原来无泄漏的 22min 延至 42min,最终仍然能达到要求的真空度 10^{-1} Pa。所以设备的泄漏会对钎焊接头质量有较大的影响。所以,对真空钎焊设备要求定期检查泄漏率,是非常重要的。

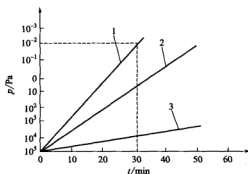


图 5.21 抽真空曲线

1—理想抽真空曲线；2—实际抽真空曲线；3—泄漏曲线

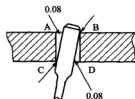


图 5.22 装配不当示意图

(3) 装配间隙

接头间隙尽管设计很正确,但在装配不当时,会引起钎焊间隙的变化,继而影响钎缝质量,如图 5.22 所示。插入件倾斜,造成一端卡死,另一端毛细作用丧失。

(4) 气体纯度

钎焊时用于调节炉的压力或用于强迫冷却的高纯氩气或氮气,含氧量要尽量少 ($<5 \times 10^{-6}$),露点要尽量高 (-67°C 以下)。尤其是对作为调节炉内压力用的气体纯度要求更严格一些。因为钎焊件在高温时,一直是处于这种气氛保护下,它对钎缝未形成前被钎焊件表面的影响至关重要。当然,起冷却作用的气体也会给钎焊件质量带来不利影响,同时还会给

真空炉的加热元件带来一定的危害。因此,也要求使用高纯气体,在没有高纯气体的情况下,对普通纯度氩气或氮气,要通过净化装置净化后才可使用,否则会缩短真空炉的寿命。常用的冷却气体纯度标准见表 5.10。

表 5.10 冷却气体纯度标准

气体名称	含量/%	杂质含量/ 10^{-5}					
		N ₂	O ₂	H ₂ O/(mg/m ³)	H ₂	CO ₂	C _n H _m
高纯氩气	99.999	—	—	<3	—	—	—
高纯氩气(一级品)	99.999	<5	<1	<1	<1	<1	<1
高纯氩气(二级品)	99.996	<4	<5	<8	<2	—	—

5.4.2 钎缝常见缺陷的防止措施

(1) 钎缝缺陷分析

真空钎焊生产实践中常常会产生一些缺陷,通常可分为外观缺陷和内部缺陷,这些缺陷的产生原因及预防措施见表 5.11。

表 5.11 钎缝缺陷分析

缺陷		产生原因	预防措施
类别	名称		
外观缺陷	未钎着(在待焊面的接缝处没有形成连接)	① 钎料选择不当,润湿性差 ② 钎焊温度选择不合理及炉温不均匀 ③ 真空度低,待钎部位氧化 ④ 焊件清洗不干净 ⑤ 装炉位置不正确 ⑥ 夹具失效 ⑦ 钎焊间隙设计不合理	① 彻底清洗焊件以去除表面氧化膜,改善钎料的润湿性 ② 合理选择钎料及钎焊温度 ③ 改进钎焊间隙,优化钎焊工艺参数
	钎缝圆根不饱满	① 钎焊温度太高 ② 钎料性能不合格 ③ 填充钎料量不足	① 填充足量的钎料 ② 控制合适的钎焊温度 ③ 选择合适的钎料
	钎缝不连续	① 局部未清洗干净或装配时重新污染 ② 真空度不够高,润湿性差 ③ 钎料量不足 ④ 钎料流动性差 ⑤ 钎焊温度偏低	① 装配前彻底清洗,可增加诸如超声波之类的清洗工序 ② 在装配时,戴干净棉质手套,以免污染焊件 ③ 适当提高真空度 ④ 填充足量钎料或更换钎料 ⑤ 适当提高钎焊温度
	钎缝堆高	① 钎料熔化温度范围过大 ② 钎焊工艺选择不当,出现偏析或元素偏聚,导致钎料熔化温度提高 ③ 钎料填注过量	① 选择合适的钎料并控制用量 ② 适当提高钎焊温度
	钎缝熔蚀	① 在钎焊温度下保持时间过长 ② 选择钎焊温度偏高 ③ 钎料选择不当,合金化作用太剧烈	① 合理选择钎料 ② 适当降低钎焊温度 ③ 适当缩短高温停留时间
	裂纹	① 接头设计不合理 ② 钎料选择不当 ③ 夹持方法不当,内部零件热膨胀系数过大,把外部零件撑破或压裂 ④ 组件在炉中放置不当 ⑤ 冷却速率太快	① 合理改进接头设计 ② 对母材热膨胀系数相差悬殊的接头应增加“补偿片”吸收应力 ③ 改进装配,使装配应力降低到极限值 ④ 适当降低高温时的冷却速率,让热应力得以充分释放或重新分布 ⑤ 焊件装炉时,尽量使大厚件位于下方,避免发生压裂

续表

缺陷		产生原因	预防措施
类别	名称		
外观缺陷	变形	① 夹具设计不当或选材欠妥 ② 加热冷却太快 ③ 装炉位置不合理 ④ 炉温均匀性差	① 正确设计和使用夹具 ② 对结构提出合理建议与正确装炉 ③ 控制加热冷却速率及改善炉温均匀性
	钎料溢流	① 钎料填充过量 ② 钎焊温度偏高 ③ 钎焊间隙太大,无法自持液态钎料重量 ④ 阻钎剂少或质量差	① 酌情减少钎料用量 ② 适度降低钎焊温度 ③ 改进接头设计的钎焊间隙 ④ 适当增大阻钎剂用量
	氧化	① 真空度不够或设备泄漏 ② 焊件在装炉时污染 ③ 炉膛有污染或抽气系统出现故障 ④ 调压或冷却用气体纯度低	① 定期校验真空度指示仪表,确保仪表运转正常 ② 定期检查设备泄漏率 ③ 根据材料正确选择真空度 ④ 限制气体纯度及露点 ⑤ 控制加热速率,保证加热室的清洁
内部缺陷	未钎透	① 钎料选择不当或钎料量不足 ② 真空度选择不当,当真空度过高时,钎料挥发量不足;真空度过低时,焊件表面的氧化物得不到彻底清除或在加热时继续氧化,使钎料润湿性变差 ③ 钎焊前清洗不干净或重新污染 ④ 钎料放置不利于填充间隙 ⑤ 钎焊间隙过大而没有加大间隙填料,毛细作用丧失 ⑥ 接头太长,钎料的填隙能力不及	① 提高真空度,改善钎料润湿性能 ② 正确选择钎料和填充用量 ③ 装配前认真清洗,必要时增加特殊清理工序 ④ 对过大间隙采用间隙填料 ⑤ 装炉尽可能使钎料的重力与毛细力叠加 ⑥ 改变钎料填充方式及位置,适当提高钎焊温度或延长钎焊时间
	组织疏松	① 钎料选择不当或质量欠佳 ② 真空度过高,钎料中合金元素离析挥发	① 选择优质钎料 ② 控制钎焊温度下的真空度
	空穴	① 母材钎焊前未做除气处理 ② 钎焊前局部清洗不干净 ③ 钎料的润湿性或流动性差 ④ 钎焊温度偏低 ⑤ 钎焊间隙不均匀	① 认真清洗焊件,必要时增加特殊清理工序 ② 选择润湿性和流动性好的钎料,或选择粘带或箔状钎料,直接夹在待焊件之间 ③ 母材钎焊前作除气处理,适当提高钎焊温度
	脆性相	① 钎焊间隙太大 ② 钎料选择不当 ③ 高温扩散处理时间太短	① 严格控制钎焊间隙 ② 选择不易形成脆性相的钎料,或添加能够置换脆性相的金属粉末 ③ 在钎焊温度下保持适当长的时间

(2) 缺陷补救方法

① 未钎着的补救 重新清理接头,按新制件重复钎焊工序。

② 钎缝圆根不饱满的补救 在原钎缝上重新填注适量钎料,选择钎焊温度范围的下限进行补焊,通常能获得较为满意的结果。

③ 钎缝不连续的补救 在局部不连续处填加钎料(可以是熔点较低的钎料,也可以是相同的钎料),选择阶梯钎焊温度或相同钎料钎焊温度范围的下限进行补焊。

④ 钎缝堆高的补救 用机械法去除;精密部件或特殊接头,可以提高钎焊温度,重复炉中循环予以消除。

⑤ 钎缝熔蚀的补救 选用能与钎缝发生新的合金化作用的钎料,在比较低的温度下熔融处理,以改善接头组织。

⑥ 裂纹的补救 根据裂纹宽度不同,选择合适的钎料,直接涂在裂纹上进行补焊。

⑦ 变形的补救 根据变形具体情况,设计合理的夹具,按材料热处理制度进行校形。对于变形量大的工件,可进行多次校形。

⑧ 钎料溢流的补救 对溢流到不需钎焊的部位的钎料,用机械法去除。

⑨ 氧化的补救 进行酸洗或真空净化去除氧化膜。如还有加工余量,可通过机械加工去除。如果加工余量极小,还可以考虑湿喷砂方法去除。

⑩ 未焊透的补救 认真清理未钎透部位,在缺钎料端填加钎料,重复钎焊循环或选择大间隙钎料,提高钎焊温度进行钎焊。

⑪ 组织疏松的补救 用较低的温度和低蒸汽压钎料填注在钎缝处,选择合适的钎焊温度进行扩散处理。重要部件还可以进行热等静压处理,使钎缝组织变致密。

⑫ 空穴的补救 不加钎料,提高钎焊温度超过钎缝重熔温度进行较长时间的扩散处理或低于钎缝重熔温度进行固溶处理,能使空穴变小或消失,获得致密接头。

⑬ 脆性相的补救 重新加热至合适温度(主要根据钎缝重熔温度和母材与钎料的冶金相容性而定),进行长时间的扩散处理而消除。但是,有些脆性相是无法消除的。

5.4.3 钎焊接头的质量检验

钎焊组件和制品的生产过程中,检验是必不可少的工序,它不仅能防止不合格的钎焊产品出厂,重要的是能够及时发现产品中的缺陷,分析缺陷产生的原因,并在整个过程中加以控制和防止。因此,质量检验包括先期检验、生产检验和成品检验三个阶段。先期检验是钎焊开始前,包括图样检验、原材料和消耗材料的检验、准备工作检验(焊件清理、装配质量、设备性能等),其目的是预先防止或减少钎焊时缺陷产生的可能性。生产检验是钎焊过程中,包括钎焊工艺是否规范、钎焊程序是否正确、设备运转是否正常等,其目的是防止钎焊过程中这些环节不恰当而造成的一些缺陷。成品检验是在组件或结构完成以后进行的,根据对产品不同的要求(承载能力、密封性、耐腐蚀性等),进行相应的检验,检查钎焊接头内部或外部的缺陷。

钎焊接头的检验可以用试验制样,也可用完成的钎焊件进行。既可以是破坏性检验,也可以是非破坏性检验。

(1) 无损检验

① 外观检验 钎焊接头的外观检查是一种手续简便而又应用广泛的检验方法,是成品检验的一项重要内容。一般是通过肉眼观察,如果看不清,可用10~30倍放大镜。对于不能直接观察的内孔钎缝,可利用内窥镜插入孔内进行检查。外观检查主要用于检查钎缝圆根形成情况、钎缝堆高、钎料溢流、未钎透、钎缝不连续以及母材表面的开裂、熔蚀和疏松等缺陷。真空钎焊获得的钎缝较光洁,最适宜目视检查。钎料自动填缝,在未加钎料一侧可看到钎缝痕迹,可判断这种钎缝已钎透,并且不会产生气孔、夹渣等缺陷。

② 渗透探伤 渗透探伤包括着色探伤和荧光探伤两种,它利用某些液体的渗透性等物理特性来发现和显示缺陷。可用于检查铁磁性或非铁磁性材料表面的缺陷,例如检查目视检查难以发现的微小裂纹、气孔、疏松、未钎透等缺陷。渗透探伤的具体过程是把钎缝表面的污物清除干净后,接头表面涂覆带有红色颜料或荧光材料的渗透剂,使它们渗入表面缺陷中,再用清洗液将表面上的渗透剂清洗干净后,喷上显像剂,使表面缺陷内残留的渗透剂渗出,便可显现出缺陷的痕迹。着色法所显示的缺陷在一般光线下能看到红色的痕迹;荧光法所显示的缺陷痕迹,在紫外线照射下,产生明显的黄绿色荧光。这类方法的优点是比较简单,能用于各种母材的钎焊件,但缺点是只能显示缺陷的分布情况,不能确定其深度,探伤速度较慢。另外,如果检验后要缺陷进行修补,不宜采取这种检验方法,因为很难彻底清

除已渗入缺陷的渗透剂。

③ 磁粉探伤 磁粉检验一般不用于钎焊接头,因为大多数钎焊接头都是非磁性的。但是,钎焊金属结构,例如蜂窝结构,就可以使用这种检验方法。利用一种含有磁粉的薄膜胶片,可以记录钎焊接头中的质量变化。在用后的几分钟内,胶片凝固,而把磁粉“凝结”在一定的位置上,可以观察被检验结构上的磁粉分布,从而看出缺陷的形状,但不能确定其深度。检验后,可以把胶片剥下来,作为一种永久性的记录保存。这种方法设备简单,仅用充磁与退磁设备,探伤速度快,适于进行大批量检验。

④ 射线探伤 射线探伤是利用射线可以穿透物质和在物质中有衰减的特性发现缺陷的一种检验方法。根据探伤所使用的射线种类可分为X射线探伤、 γ 射线探伤和高能射线探伤三种。由于其显示缺陷的方法不同,每种射线探伤又分为电离法、荧光屏观察法、照相法和工业电视法等。其中以照相法显示效果较好,目前应用较广。在钎焊接头质量检验中也多用这种方法,可以检查未钎着、未钎透、缩孔和裂纹等缺陷,在评定射线照相的结果时,必须考虑母材和钎料对射线吸收特性的差别。为了可靠地检查不同厚度的接头,需要专门的技术。

⑤ 超声波探伤 超声波探伤适用于检验钎焊接头,具有以下优点:灵敏度高、设备灵巧、操作方便、探测速度快、成本低、对人体无害等。这种方法的适用性,在很大程度上取决于接头设计及钎焊组件邻近区域的形状。其主要方法是使用一个单一的换能器,检测结合表面反射回来的脉冲波形。利用钎合良好的接头反射回的波形与未钎合接头反射波形的不同来显示钎焊接头的缺陷。

⑥ 致密性检验 致密性检验是用来测定钎缝或钎焊容器的密封性试验。致密性检验的方法主要有煤油试验、沉水试验、载水试验、冲水试验、吹气试验、氨气试验、氦气试验等。

煤油试验是利用煤油沿着毛细管有较强的渗透能力来检查钎缝致密性的一种方法。检查时,在钎缝外侧涂上白粉水溶液,干燥后,将煤油仔细涂在钎缝的另一面。当钎缝中有贯穿性缺陷时,煤油就会通过,并在白粉涂过的表面上显示出油迹。这种方法简便经济,常用于敞开式容器钎焊件的检查。

载水试验是将容器的全部或部分充水,观察钎缝表面是否有水渗出,这种方法常用于不受压力的容器或敞口容器的检查。

充水试验是在钎缝的一侧用高压水流喷射,而在钎缝的另一侧观察是否漏水。沉水试验是将工件浸入水中,然后冲压缩空气,当钎缝中存在缺陷时,则在缺陷处有气泡出现。前者适于大型敞口容器,后者适于小型容器。

吹气试验使用压缩空气对着钎缝一侧猛吹,钎缝另一侧涂上肥皂水,有缺陷时,便产生肥皂泡。

氦气试验是将容器的钎缝表面用5%的硝酸汞水溶液浸过的纸带上,在容器内加入含1%体积氦气的混合气体,加压至所需压力值时,如果钎缝有不致密的地方,氦气就会透过钎缝作用到浸过硝酸汞溶液的纸上,使该处形成黑色图像,从而可以确定钎焊缺陷部位。这种方法比较准确、便宜和迅速,又可在室温下检查。

氦气试验是通过被检容器充氦或用氦气包围容器后,检查容器是否漏氦。它是一种灵敏度较高的致密性试验方法,易于发现十分微小的缺陷。

⑦ 液晶探伤 液晶探伤是基于热传导原理和液晶的特性来显示工件内部缺陷的。当物体外加加热时,其内部或表面如有缺陷存在,由于缺陷与工件的密度、比热容和热传导等性能不同,引起热传播的不均匀而反映到工件的表面,造成表面温度分布不均匀,作用到被测

表面的液晶膜,由于液晶的光学特性,把这种温度的不均匀分布转换为可见的彩色图像,从而显示工件上的缺陷。它适用于检验大面积结构的近表面缺陷,特别适用于检验金属或非金属的蜂窝结构板的质量。又如钎焊的飞机螺旋桨叶片,在出炉后几秒钟内趁其温度还高时 just 进行液晶探伤,会取得很好的结果。

液晶探伤的方法有涂布法和贴膜法两种。涂布法是先将探伤工件清理干净,在探测表面均匀地涂上一层薄薄的底色,以利于衬托液晶的彩色图像。当底色变干以后,便将石油醚稀释的液晶均匀涂上,当石油醚挥发以后,将工件加热至该液晶的工作温度以上,然后缓冷。这时要注意观察,当冷至工作温度时,便可根据液晶颜色的不同来判断,分析缺陷的性质、大小和位置。贴膜法与涂布法相似,不同的是,液晶不是涂上,而是把事先制成的液晶膜贴上去。此法的好处是工件检验后,还可将膜撕下重复利用。这种探伤方法不需要专门的设备和仪器,对比清楚、便于观察、灵敏度高、灵活方便,大至航空部件,小至集成元件,都可利用其进行探伤。

(2) 破坏性检验

破坏性检验方法用于钎焊接头的抽样检查。在抽检中,按规定抽出全部产品的一个小百分比数量产品做破坏性试验。假定这些试样代表所有全部产品,并由此来确定不同批次或炉号的产品是否合格。如果抽检是用于该校某种无损检验方法,则须每隔一定时间抽出一个样品做破坏性试验,以便对钎焊过程保持严格的控制,确保钎焊产品质量。

① 撕裂试验 撕裂试验常用于评定钎焊搭接接头的质量。试验时,将一个部件刚性固定,而把另一个部件从接头处撕开。这种实验可用作评定钎焊的一般质量,检查接头中是否存在未钎透、气孔或夹杂等缺陷。这些缺陷的容许数量、大小和分布,取决于接头的使用条件。

② 力学性能试验 在钎焊质量控制中,力学性能试验主要是用来测定钎料和钎焊接头在各种条件下的强度、塑性和韧性数据。根据这些数值来确定钎料和钎焊接头是否满足设计和使用要求,同时,亦可根据这些数据判断所选的钎焊工艺是否正确。

拉伸试验或剪切试验通常用于测定接头的强度。这种试验更多地用于实验室,测定钎料的基本强度和判断接头设计的适用性,但也可用于检验接头和母材部件的相对强度。拉伸和剪切试验用于测定低于或高于室温使用条件下的强度也很有效。

疲劳试验仅用于有限的范围,而且多数情况下是对钎焊接头和母材一起试验。一般来讲,疲劳试验需要很长的时间才能完成,因而很少用于质量控制。

冲击试验和疲劳试验类似,通常限于实验室研究。通常的标准试样不太适合钎焊接头。为了取得在低于或高于室温条件下的准确结果,可能需要制备特殊形式的接头。

扭曲试验有时用于钎焊接头的质量控制,特别是在螺栓、螺钉或管状构件与大型截面构件进行钎焊的情况下。

弯曲试验可用于测定钎焊接头总的塑性,这个总的塑性用弯曲角来表示。试样弯曲程度的具体要求按产品的技术条件制定。经弯曲后的试样在接头处若无裂纹或断口,则认为合格。

硬度试验可以测定钎焊接头对弹性和塑性变形的抗力及材料破坏时的抗力。这种试验的测量点很小,可在接头的每一区内进行测定,从而可以协助精确地判断整个结构或产品的性能。

③ 金相试验 钎焊接头的金相分析包括扩散区、钎缝界面区和钎缝中心区以及母材的粗晶组织分析和显微组织分析。通过对钎焊接头金相组织的了解,可以判定对该产品选择的钎焊工艺的正确性、钎焊工艺参数对质量的影响、钎料的类别、热处理以及其他鉴定接头力

学性能的各种因素的影响,并且可查明接头中的缺陷情况和确定它们产生的原因。

粗晶分析是在钎焊接头的断口和磨片上进行的,断口是在试件做力学性能和工艺试验后来观察的,按照断口可以判断金属是塑性破坏还是韧性破坏,并可查明有无缺陷。而接头磨片的粗晶分析中,可以查明接头各区的界限、结合状态以及未钎透、气孔、裂纹和疏松等缺陷。做粗晶分析的试样可以从钎焊试件或产品内截取,也可以不取样,直接在受检验的接头上钻孔和对孔内的金属进行观察。这种钻孔粗晶分析,一般是用来检验接头的钎透程度和钎缝的致密性,同时也可检验出其中的气孔、裂纹和未钎透等缺陷。

显微分析可以确定钎焊接头各部分的组织特性、晶粒大小、显微缺陷和组织缺陷等。根据显微分析的结果,判断所用钎料、钎焊工艺、钎焊规范参数和钎后热处理方法等是否正确,并可据此提出改进方法。显微分析的磨片,一般是从试件上或从产品上截取的。

(3) 工况模拟试验

钎焊生产中,对于有些产品仅仅做钎缝或接头的质量检验是不够的,特别是那些在特殊条件下或恶劣工况下使用的产品,还应根据实际使用情况进行相应的工况模拟实验,用以考核这方面的性能是否达到设计要求的指标,作为验收与否的依据。

① 受压力容器钎焊接头强度试验 用于储藏液体或气体的受压力容器,除进行密封性试验外,还必须对产品整体进行接头强度试验,用以检验钎焊接头强度是否符合产品设计要求。这种试验一般分为破坏性强度试验和超载试验两类。

进行破坏强度试验时,试验施加负荷的性质(压力、弯曲、扭转等)和工作载荷的性质相同,负载要加至产品破坏为止。用破坏负荷和正常的工作载荷的比值来说明产品的强度情况,比值达到或超过规定的数值时为合格。这种试验在大量生产而质量尚未稳定的情况下,抽取百分之一或千分之一来进行;在试制新产品或改变产品的加工工艺规范时也应采用。

超载试验是对产品所施加的负荷超过工作载荷一定程度,如超过25%、50%来观察接头是否出现裂纹、变形来判断其强度是否合格。

受压力容器整体的强度试验,加载方式有水压和气压两种。气压试验比水压试验更为灵敏和迅速,且试验后不用排水处理,但是试验的危害性比水压试验大,必须遵守安全规程。

② 抗氧化、耐腐蚀试验 对于工作在氧化或者腐蚀介质中的钎焊件,除了选择钎料时充分考虑耐腐蚀性外,对接头的抗氧化、耐腐蚀性还要做进一步的试验和考察。例如,对于锂反应器,从理论上分析,它对镍基钎料的腐蚀十分剧烈,但是实际选用BNiCrSiBCo钎料钎焊后,钎缝耐腐蚀作用得到充分的肯定。

③ 电子器件的电性能试验 对于电子器件,应当对钎焊接头进行电性能试验,考核其导电性能和绝缘性能等。

第6章 不同材料的钎焊

随着钎焊技术的不断发展及新型钎料的开发应用,可钎焊的基体材料种类日益增多,主要包括有色金属、钢铁材料、高温合金、耐磨材料、新型特种材料以及异种材料等,所用钎料主要有锡基、铝基、银基、铜基、锰基、镍基和钛基等。针对不同材料的钎焊特点,选用合适的加热方式及钎焊材料,控制钎焊工艺参数,掌握正确的操作要点是保证钎接头质量的关键。

6.1 有色金属的钎焊

6.1.1 铝及铝合金的钎焊

铝合金钎焊结构在航空航天领域有广泛应用,如铝合金热交换器、波导及缝阵天线、发动机机箱等,这些部件设计结构复杂,具有多层、复杂通道,焊合率要求高,变形要求小,需要一次完成焊接。要实现铝合金复杂结构焊接,钎焊是首选的焊接方法。

(1) 铝及铝合金的钎焊特点

① 软钎焊特点 软钎焊时,由于钎料和母材之间电极电位相差悬殊,会给钎焊接头的抗腐蚀性带来不利影响。纯铝 1050A、1035、1200、8A06 和铝锰合金 3A21 的软钎焊性优良,容易进行钎焊。铝镁合金的软钎焊性与合金的 Mg 含量有关,一般 Mg 的质量分数小于 1.5% 时,钎焊性较好;Mg 的质量分数高于 1.5% 时,用有机钎料和低温钎剂钎焊比较困难,用高温软钎料和反应钎剂比较容易钎焊。此外,Mg 的质量分数大于 0.5% 的铝合金用含 Sn 钎料钎焊时可能产生晶间渗入。当用有机软钎剂钎焊时,随着 Mg 含量的增多,Pb-Sn-Zn 低温软钎料的铺展面积急剧减小。这是由于 Mg 含量高的铝合金表面 Mg 的氧化物增多,有机软钎剂难以去除,致使钎料难以铺展。用 Zn-Al 钎料和反应钎剂钎焊铝镁合金时,钎料的铺展性基本不受含 Mg 含量的影响,因为反应钎剂是依靠与母材反应而破坏和清除母材表面氧化物,并在母材表面沉积纯金属层来保证 Zn-Al 钎料的铺展性。

铝合金的 Si 含量对其钎焊性也有很大影响。不论是使用低温软钎料和有机软钎剂、还是使用高温软钎料和反应钎剂,随着铝合金中 Si 含量的增高,钎料的铺展性均下降。这是因为铝硅合金表面上的氧化硅在有机软钎剂,特别是在反应钎剂中溶解量很小,所以影响钎料的铺展。

热处理强化的铝合金,如 2A11、2A12、锻造铝合金等,在钎焊加热时将发生过时效和退火等现象。这种热处理强化铝合金适于在 300℃ 以下或 450℃ 以上的温度钎焊,即不宜采用高温软钎焊。但用低温软钎料钎焊,接头强度低,不能发挥高强度铝合金的性能。加上这些合金大多有被钎料晶间渗入的倾向,因此一般不宜采用软钎焊。

② 硬钎焊特点 铝对氧的亲合力极大,表面很容易生成一层致密稳定、熔点很高的氧化铝膜,且很难去除。室温时氧化膜厚度为 5nm 左右,在 500~600℃ 的钎焊温度下,氧化膜厚剧增至 100~200nm,阻碍钎料和母材的润湿和结合,成为钎焊的主要障碍之一。

硬钎焊时,由于钎料的熔点同铝及铝合金的熔点相差不大,所以必须严格控制钎焊温度;一些热处理强化的铝合金,还可能因钎焊加热引起过时效或退火等软化现象,导致母材性能降低;火焰钎焊时,因铝合金在加热中颜色不改变,温度判断比较困难,因此对操作者

技术水平要求较高。纯铝和铝锰合金 3A21 的钎焊性最好,其表面氧化物可以用钎剂清除。

对于铝镁合金, Mg 的质量分数高于 1.5% 时,随着 Mg 含量的增加,合金表面的氧化镁增多,现有的钎剂不能有效地去除,致使合金的钎焊性变差。当合金中 Mg 的质量分数达到 2.5% 时,钎焊困难,不推荐用钎焊方法连接。硬铝的钎焊性很差,主要问题是出现过烧,如 2A12 硬铝,当加热温度超过 500℃ 以上时就发生过烧,因此钎焊温度应在 500℃ 以下。

目前,由于缺少合适的钎料,超硬铝的硬钎焊是困难的,如 7A04 超硬铝在超过 470℃ 时就发生过烧,除采用快速加热的钎焊方法(如浸渍钎焊)外,不宜进行硬钎焊。锻铝合金中 6A02 的钎焊性比较好,其 Mg 含量低,对钎焊性无有害作用。6A02 合金的固相线温度为 593℃,在低于 590℃ 的温度下进行炉中钎焊,合金不会发生过烧现象。如果钎焊温度超过其固相线温度,可能出现不连续的过烧组织;若钎焊温度超过 600℃,则将出现明显的过烧组织,所以钎焊这种合金时应严格控制钎焊温度不超过其固相线温度,钎焊保温时间也应尽量短。

铝及铝合金的钎焊性比较见表 6.1。

表 6.1 铝及铝合金的钎焊性比较

种类	牌号	原牌号	熔点/℃	名义成分(质量分数)/%	软钎焊性	硬钎焊性
纯铝	1060~1200	L2~L5	660	Al>99	优良	优良
防锈铝	3A12	LF21	643~654	Al-1.3Mn	优良	优良
	5A01	LF1	634~654	Al-1Mg	良好	优良
	5A02	LF2	527~652	Al-2.4Mg	困难	良好
	5A03	LF3	—	Al-3.5Mg	困难	很差
	5A05	LF5	568~638	Al-4.7Mg	困难	很差
硬铝	2A11	LY11	515~641	Al-4.3Cu-0.6Mg-0.6Mn	很差	很差
	2A12	LY12	505~638	Al-4.3Cu-1.5Mg-0.6Mn	很差	很差
锻铝	6A02	LD2	593~651	Al-0.4Cu-0.7Mg-0.8Si-0.25Cr	良好	良好
	2B50	LD6	545~640	Al-2.4Cu-0.6Mg-0.9Si-0.15Ti	困难	困难
超硬铝	7A04	LC4	477~638	Al-1.7Cu-2.3Mg-6Zn-0.2Cr-0.4Mn	很差	很差

(2) 钎料与钎剂

① 钎料 铝钎焊分为软钎焊和硬钎焊,钎料熔点低于 450℃ 时称为软钎焊,高于 450℃ 时称为硬钎焊。铝用软钎料按其熔化温度范围,可以分为低温、中温和高温软钎料三组。常用的铝用软钎料及其特性见表 6.2。

表 6.2 铝用软钎料及其特性

类别	牌号	合金系	化学成分(质量分数)/%						熔化温度/℃	润湿性	相对耐蚀性	相对强度
			Pb	Sn	Cd	Zn	Al	Cu				
低温	HL607	锡或铅基	51	31	9	9	—	—	150~210	较好	低	低
	—	加锌、锡	—	91	—	9	—	—	200	较好		
中温	HL501	锌锡或	—	40	—	58	—	2	200~360	良好	中	中
	HL502	锌锡基	—	60	—	40	—	—	265~335	优秀		
高温	HL506	锌基	—	—	—	95	5	—	382	良好	良好	高
	—	加铝或铜	—	—	—	89	7	4	377	良好		

铝用低温软钎料主要是在锡或锡铅合金中加入锌或镉,以提高钎料与铝的作用能力,熔化温度低(熔点低于 260°C),操作方便,但润湿性较差,特别是耐蚀性低。铝用中温软钎料主要是锌锡合金及锌镉合金。由于含有较多的锌,比低温软钎料有较好的润湿性和耐蚀性,熔化温度为 $260\sim 370^{\circ}\text{C}$ 。

铝用高温软钎料主要是锌基合金,含有 $3\%\sim 10\%$ 的铝和少量其他元素,如铜等,以改善合金的熔点和润湿性。熔化温度为 $370\sim 450^{\circ}\text{C}$,钎焊铝接头的强度和耐蚀性明显超过低温或中温软钎料。几种铝用锌基软钎料的特性和用途见表 6.3。

表 6.3 几种铝用锌基软钎料的特性和用途

钎料型号(牌号)	化学成分/%	熔化温度/ $^{\circ}\text{C}$	特性和用途
S-Zn95Al5	Zn95, Al5	382	用于钎焊铝及铝合金或铝铜接头,钎焊接头具有较好的抗腐蚀性
S-Zn89Al7Cu4	Zn89, Al7, Cu4	377	
S-Zn73Al27(HL505)	Zn72.15, Al27.5	430~500	用于钎焊液相线温度低的铝合金,如 LY12 等,接头抗腐蚀性是锌基钎料中最好的
S-Zn58Sn40Cu2	Zn58, Sn40, Cu2	200~359	用于铝的刮擦钎焊,钎焊接头具有中等抗腐蚀性

为了保证钎焊接头具有较高的强度,须采用硬钎料进行钎焊。一般要求一定强度性能的铝及铝合金钎焊产品都采用硬钎焊。铝用硬钎料以铝硅合金为基,有时加入铜等元素降低熔点,以满足工艺性能要求。铝及铝合金的硬钎焊常采用铝基钎料进行钎焊。常用铝基钎料有铝硅、铝铜硅、铝硅锌铜、铝硅镁等,常用铝及铝合金硬钎料的牌号和钎焊温度见表 6.4。

表 6.4 常用铝及铝合金硬钎料的牌号和钎焊温度

钎料牌号	钎焊温度/ $^{\circ}\text{C}$	钎焊方法	可钎焊的材料(新牌号)
HLAlSi7.5	599~621	浸渍、炉中	1070, 1060, 1050, 1035, 1100, 1200, 3A21
HLAlSi10	588~604	浸渍、炉中	1070, 1060, 1050, 1035, 1100, 1200, 3A21
HLAlSi12	582~604	浸渍、炉中、火焰	1070, 1060, 1050, 1035, 1100, 1200, 3A21, 5A02, 6A02
HLAlSiCu10-4	585~604	火焰、炉中、浸渍	1070, 1060, 1050, 1035, 1100, 1200, 3A21, 5A02, 6A02
HL403	562~582	火焰、炉中	1070, 1060, 1050, 1035, 1100, 1200, 3A21, 5A02, 6A02
HL401	555~576	火焰	1070, 1060, 1050, 1035, 1100, 1200, 3A21, 5A02, 6A02, 2B50
B62	500~550	火焰	1070, 1060, 1050, 1035, 1100, 1200, 3A21, 5A02, 6A02, 2B50
HLAlSiMg7.5-1.5	599~621	真空炉中	1070, 1060, 1050, 1035, 1100, 1200, 3A21
HLAlSiMg10-1.5	588~604	真空炉中	1070, 1060, 1050, 1035, 1100, 1200, 3A21, 6A02
HLAlSiMg12-1.5	582~604	真空炉中	1070, 1060, 1050, 1035, 1100, 1200, 3A21, 6A02

铝基钎料常用形式有丝、棒、箔片和粉末,还可以制成双金属复合板,以简化钎焊过程,用于钎焊大面积或接头密集部件,如热交换器等。带钎料铝复合板的成分及特性见表 6.5。

表 6.5 带钎料铝复合板的成分及特性

牌号		标称成分(质量分数)/%					熔化区间/ $^{\circ}\text{C}$	钎焊温度/ $^{\circ}\text{C}$	常用的钎料形式	可用的钎焊方法
		Si	Cu	Mg	Bi	Al				
4343	—	7.5	—	—	—	余量	577~617	600~620	复合板、箔	浸渍、炉中
4545	—	10	—	—	—	余量	577~600	590~605	复合板、箔	浸渍、炉中
4047	HL400	12	—	—	—	余量	577~582	582~605	丝、箔、粉末	火焰、浸渍、炉中

续表

牌号		标称成分(质量分数)/%					熔化区间/℃	钎焊温度/℃	常用的钎料形式	可用的钎焊方法
		Si	Cu	Mg	Bi	Al				
4145	HL402	10	4	—	—	余量	520~585	570~605	棒	火焰、浸渍、炉中
34A	HL401	5	28	—	—	余量	525~535	535~580	复合板	火焰、炉中
—	—	7.5	—	2.5	—	余量	560~607	600~620	复合板	真空炉中
4004	—	10	—	1.5	—	余量	560~596	590~605	复合板	真空炉中
—	—	12	—	1.5	—	余量	560~580	580~605	复合板	真空炉中
—	—	10	—	1.5	0.1	余量	560~596	590~605	复合板	真空炉中

② 钎剂 铝用软钎焊钎剂按其去除氧化膜方式通常分为有机钎剂和反应钎剂两类,有机钎剂的主要组分是三乙醇胺,为了提高活性,可以加入氟硼酸或氟硼酸盐。反应钎剂含有大量锌和锡等重金属的氯化物。

除了炉中真空钎焊及惰性气体保护钎焊外,所有铝及铝合金硬钎焊均要使用化学钎剂。铝用硬钎剂的组成是碱金属及碱土金属的氯化物,它使钎剂具有合适的熔化温度,加入氯化物的目的是提高去除铝表面氧化物的能力。如 QJ201 钎剂具有较好的活性,能充分去除氧化膜,保证钎料的铺展,特别适用于火焰钎焊。使用 QJ201 炉中钎焊铝时,为了防止钎剂中的氯化锌熔蚀母材,必须缩短钎剂与母材作用的时间,为此可将焊件预热。炉中钎焊也可使用不含氯化锌的钎剂,其熔蚀母材的倾向小,但去除氧化物的能力也较弱,因此须保证钎焊前母材表面的清洁。上述钎剂对母材均具有强腐蚀性,钎焊后必须仔细清除钎剂残渣。由于产品结构和工艺的原因,这一要求并不总能达到,所以发展了无腐蚀性的氟化物铝钎剂,配合铝硅钎料用于炉中钎焊,去膜效果好,不吸潮,不与母材作用,但熔点高限制了其使用范围。

(3) 接头设计与装配

① 接头形式 铝钎焊大多采用搭接、套接或 T 形接头,很少采用对接接头,这是因为对接的钎焊面很小,钎缝两侧形不成圆角,而钎料的强度往往又低于母材。铝钎焊接头的形式见图 6.1。

许多有特殊要求的钎缝,例如需要密封、特殊受力或要求无变形的钎缝等,则须考虑钎缝的特殊设计,包括以下方面。

- 钎焊时钎缝宽度的变化对工装精度的影响,特别是使用片状钎料(夹入钎缝中)和压覆钎料的板材时,钎料熔化后工件整体尺寸的变化。
- 铝合金的线胀系数比通常的金属约大 1/3,因此应采用挠性夹具。
- 铝合金在钎焊受热时比较软,纤细而垂直的工件一定要进行支撑。
- 一些可热处理的铝合金钎焊后为恢复原来强度而需淬火时难免会有变形,零件应考虑留有加工余量。

在板材需要作直线连接时,常用搭接钎焊接头代替简单的对接来增强接点的强度。在钎焊较薄的板材($<3\text{mm}$),而两部分板材厚度、强度又不一致时,搭接适当的长度应该是薄板板厚的 2~3 倍。如果板材的强度更高或钎料的抗剪强度更低时,搭接的长度还应加大。

铝钎焊的钎缝间隙影响钎焊工艺和钎缝的质量。间隙越窄,熔态钎料在钎缝中的毛细作用越强,但易夹渣;间隙太宽,钎料难以流到尽头,钎缝的应力也不均匀。铝钎焊的钎缝间隙见表 6.6。

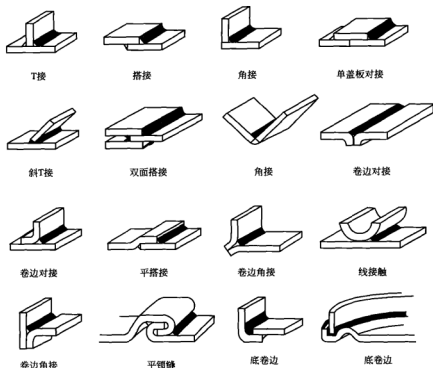


图 6.1 铝钎焊接头的形式

表 6.6 铝钎焊的钎缝间隙

mm

钎焊方法	火焰钎焊、炉中钎焊、感应钎焊		浸渍钎焊	
接头宽度	<6.5	>6.5	<6.5	>6.5
钎缝间隙	0.1~0.2	0.1~0.5	0.05~0.1	0.05~0.5

有特殊间隙要求的钎缝可以用磨尖的细锥在欲钎焊的母材表面上轻轻撞刺一些小孔，小孔边缘的翻卷可以帮助维持间隙的宽度，夹装后再进行测量，以保持需要的间隙。钎焊接头处不允许存在盲孔和封闭空间，必须有排气或排出残留钎剂的通道。

② 钎料放置 钎焊时钎料的供给可采用将钎料安放在紧靠钎缝间隙的旁边、使用压覆钎料的板材和钎焊时手工临时供给三种方式。成形的钎料有丝、棒、片、环、垫圈、管等各种形式，可以根据需要采用，例如管与法兰连接可以采用环形钎料，大面积搭接可以在间隙中夹入钎料箔等，或采用丝状钎料时，可以将钎料丝剪成小截，考虑工件上熔化钎料的行走路线，布置许多点安放若干钎料小截，这样可以一次完成长而复杂交错的多个钎缝。

钎料放置时需注意以下几点。

- 尽量避免熔态钎料在钎缝中作远距离流动，以免熔蚀母材和造成钎缝组织不均匀。
- 如果钎料用量较少，要将它放在沟、槽中，以免因热容量小，先熔化的部分未来得及润湿母材而流走。
- 如果母材各部件重量相差很大，钎料应当靠在大重量的部件上，使其受热时能和大重量部件的温度一致。
- 如果钎焊时加热主要是依靠热源的辐射传热，例如在火焰自动钎焊和炉中钎焊，则

要防止母材到被辐射加热钎焊温度前钎料过早熔化而流失。

e. 为避免钎料流失, 可用无水丙酮将氯化物钎剂调成糊, 把钎料粘在需要的位置上, 并在上面用少许钎剂糊覆盖。

③ 工件的夹紧和固定 简单零件钎焊时, 不需特殊固定, 零件本身的重量即足以保持原位。盐浴钎焊则必须用夹具固定。夹具的设计可以根据具体情况决定, 但应尽量减少夹具本身的体积和重量, 并采用挠性、弹性的材料。最好采用发蓝处理的钢材或氧化处理的不锈钢, 以免让夹具和铝母材钎焊在一起, 但这种材料的夹具不能用于盐浴钎焊, 盐浴钎焊常用材料是 Inconel X750 的夹具。

对于批量生产的钎焊接头, 常采用自夹紧接头, 如用铆钉、机械胀管、凸线压紧、锁缝甚至定位焊等方法固定。常用的自夹紧接头类型见图 6.2。

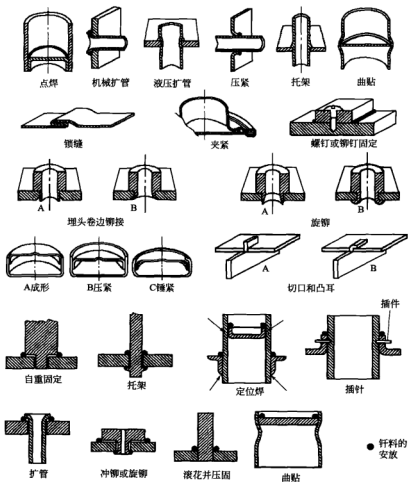


图 6.2 常用的自夹紧接头类型

(4) 焊前表面清理和焊后处理

① 焊前表面清理 钎焊零件必须仔细除去表面的各种污物、过厚的氧化膜及加工带来的油污。去除油污理想的方法是在一个密闭舱内用有机溶剂的蒸气去除。水溶液去油可用磷

酸三钠水溶液加少许表面活性剂刷洗，然后用水冲净。过厚的氧化膜可用不锈钢丝刷或铜丝刷刷磨等方法局部去除，不可采用砂纸，否则有可能嵌入砂粒。

大面积清除氧化膜常采用化学方法。通常用 5% 的 NaOH 溶液清洗，温度保持在 60℃ 左右。清洗时放出的大量碱雾对呼吸道刺激很厉害并易着火爆炸，应在良好通风处进行清洗。碱洗以后，应该用清水仔细冲净碱液。残余的微量碱液完全冲洗干净是很难的，合金上留下的黑色残渣也不易用水冲洗掉，用酸浸泡则很容易去除。为了防止酸对铝的腐蚀，应采用氧化性的酸，通常在室温下使用稀的硝酸或铬酸水溶液加一些重铬酸钾进行冲洗。酸浸后应该再用水冲净，然后风干或用温风吹干。此过程中不能用裸手直接接触，否则极易在洁净的表面上留下汗迹和指纹。清洗干燥后的工件应及时完成钎焊工作，如储存期需超过 48h，则应该先行装入塑料袋中封存。

② 焊后处理 大部分钎剂具有强烈的腐蚀性，如果钎焊后不立即清除干净，接头有很快被腐蚀破坏的危险。焊后黏附钎剂的工件必须彻底清洗干净以防腐蚀。有效的清洗方法是焊后趁热浸入沸水中并煮沸。必要时还需人工或机械刷洗工件。超声振动清洗也是有效去除钎剂的一种方法。复杂的带狭缝或小深孔的工件常需在流动的、不时更换的热水中浸泡好几天。

钎剂的最后残余常需采用化学方法清除，常用的清洗液如下。

a. 硝酸清洗液 将硝酸与水体积比为 1:1 配成溶液，室温下洗涤 10~20s，然后用水洗净。硝酸很快被残余钎剂消耗，因此这种清洗液只用来清洗小的工件和黏附钎剂不多的场合。当硝酸洗液中氯化物含量超过 5g/L 时，薄壁或纤细的工件可能被侵蚀，这时可加入质量分数为 1% 的硫脲作为缓蚀剂来防止氯化物的腐蚀。

b. 硝酸-氢氟酸混合清洗液 硝酸、氢氟酸与水的体积比为 1:0.06:9 配成的清洗液，室温下使用。工件浸入后不但迅速清除残余钎剂，还会蚀去母材金属。金属被蚀去的深度视浸泡时间而定。通常清洗 10~15min 已足够。然后用冷水冲洗干净，最后用 75℃ 左右的热水冲洗，冲洗的时间不要超过 3min，否则将出现锈斑。

c. 氢氟酸清洗液 氢氟酸与水体积比为 0.3:10 配成的清洗液，室温使用，清除残余钎剂最为有效和快速。由于此清洗液能溶解铝，所以浸洗时间不要超过 10min。它被残余钎剂消耗的速度不如硝酸，因此经常采用，但浸洗时易产生氢气，必须通风。清洗中如产生工件变色晦暗，可用硝酸恢复光泽。

d. 硝酸-重铬酸钠清洗液 5L 硝酸、3.5kg 重铬酸钠 ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) 与 40L 水配成的清洗液，最适用于清洗纤细的工件以及用于极怕腐蚀的工件。65℃ 下清洗 5~10min，清洗完毕随后用热水冲净。

e. 铬酸酐-磷酸清洗液 1L 水溶液中含铬酸酐 2% 和磷酸 5%，加热至 80℃ 使用。该清洗液适用于尺寸纤细的工件。清洗液中被洗下来的氯化物浓度超过 100g/L 时即需要换新液。

以上各种方法清洗完毕要用清水将清洗液彻底冲净，否则清洗液本身又会给工件薄弱处酿成穿孔腐蚀。要求高的工件最后还需用去离子水或蒸馏水洗涤，直到水溶液和工件表面的氯化物浓度不超过 5×10^{-6} g/L。

清洗槽在用硝酸作清洗液时可以使用不锈钢制成，在使用 HNO_3 、HF 混合洗液或 HF 清洗液时需用高分子树脂的玻璃槽，这种槽也可以用于 $\text{HNO}_3 + \text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 清洗液。

(5) 钎焊方法及工艺要点

铝及其合金的软钎焊用途不是很广泛，因为在铝表面会迅速形成氧化物，大多数情况下，要求用专门为铝软钎焊而设计的软钎剂，无腐蚀钎剂不适用。一般认为，用高 Zn 软钎

料钎焊的接头抗腐蚀性能好, Zn-Al 软钎料制作的组合件, 被认为能满足长期在户外使用的要求。中温和低温软钎料组合件的抗腐蚀性能, 通常只能满足室内或有防护的用途要求。

铝及其合金的硬钎焊常采用火焰、炉中、浸渍钎焊以及保护气氛或真空钎焊方法。

① 火焰钎焊 热源为氧-燃气火焰, 燃气种类很多, 适用于手工和自动化生产, 设备简单, 使用方便, 但操作技术难度大, 由于铝及铝合金加热时无颜色变化, 熔化时颜色变化大, 手工火焰钎焊难以精确检测、控制加热温度。对铝及其合金来说, 适用的燃气有乙炔、天然气等。铝及其合金的火焰钎焊必须配用钎剂。

火焰钎焊工艺要点如下。

a. 钎焊前, 先把钎焊处清洗干净, 涂上钎剂水溶液; 用火焰加热工件, 水分蒸发并待钎剂熔化后, 将钎料迅速加入到不断加热的钎缝中。

b. 由于钎料与母材熔点相差不大, 同时铝及铝合金在加热过程中颜色不变化, 不易判断温度, 所以火焰钎焊时操作要求十分熟练。

c. 火焰不能直接加热钎料, 因为钎料流到尚未加热到钎焊温度的工件表面时被迅速凝固, 妨碍钎焊顺利进行, 钎料的热量应从加热的工件处获得。

d. 小工件容易加热, 大工件应先将工件在炉中预热到 $400\sim 500^{\circ}\text{C}$, 然后再用火焰加热进行钎焊, 这可加快钎焊过程和防止工件变形。

铝合金火焰钎焊的工艺参数见表 6.7。

表 6.7 铝合金火焰钎焊的工艺参数

材料厚度/mm	氧-乙炔火焰钎焊			氧-氢火焰钎焊		
	喷嘴孔径/mm	氧气压力/kPa	乙炔压力/kPa	喷嘴孔径/mm	氧气压力/kPa	氢气压力/kPa
0.5	0.64	3.5	7	0.90	3.5	7
0.6	0.64	3.5	7	1.14	3.5	7
0.8	0.90	3.5	7	1.40	3.5	7
1.0	0.90	3.5	7	1.65	7.0	14
1.3	1.14	7.0	14	1.90	7.0	14
1.6	1.40	7.0	14	2.20	7.0	14
2.0	1.65	10.5	21	2.40	10.5	21
2.6	1.91	10.5	21	2.70	10.5	21
3.2	2.16	14.0	28	2.92	10.5	21

② 炉中钎焊 在空气炉中钎焊铝及其合金须配用钎剂, 用腐蚀性钎剂焊后需清除残渣。空气炉中钎焊工艺要点如下。

a. 通常采用电炉, 可做成间歇炉或连续炉两种形式, 为了避免炉壁和加热元件被钎剂的蒸气腐蚀, 炉子最好带有密封的钎焊容器。

b. 为了提高容器的使用寿命, 钎焊容器可用不锈钢或渗铝钢制作, 操作时须严格控制钎焊温度。

c. 为了避免钎焊工件局部过烧和熔化, 不采用钎焊容器的炉中钎焊时, 工件靠近电热元件一边应放置石棉板以隔离热量的直接辐射。

d. 为了减少熔化的钎剂对钎焊工件的腐蚀, 形状简单的工件还可以先装配好并在炉中加热到接近钎料的熔化温度, 将工件很快从炉内取出加入钎剂, 然后再送入炉中加热到钎焊温度。

e. 钎剂通常加入蒸馏水配成糊状溶液, 然后涂敷在被钎焊表面上。

f. 炉中钎焊的升温相对来说较慢, 因此钎剂的熔点应与钎料配合, 一般比钎料低 $10\sim 40^{\circ}\text{C}$ 。

无腐蚀性钎剂钎焊是利用 $\text{KF}\cdot\text{AlF}_3$ 无腐蚀性钎剂进行钎焊, 钎焊后无需清除残余钎剂的新技术。钎剂具有很强的活性, 能有效地去除母材和钎料表面氧化膜, 钎剂残渣不吸潮, 对铝及铝合金无腐蚀性, 不必清除残渣。钎剂在大气中熔化后很快丧失活性, 钎焊时必须快速加热, 最好用氮气保护炉中钎焊, 钎料的润湿作用显著改善, 只需涂少量钎剂。

③ 真空钎焊 无需配用钎剂的炉中钎焊方法。真空度不得低于 $1.33\times 10^{-2}\text{Pa}$ 。采用金属镁作为活化剂等的工艺措施, 使铝及其合金的真空钎焊技术得到推广应用。真空钎焊工艺要点如下。

a. 对大型多层波纹夹层复杂结构, 真空度应不低于 $1.33\times 10^{-3}\text{Pa}$, 应保证真空炉温度场均匀, 力求达到 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。

b. 使用 Mg 作为金属活化剂, Mg 作为合金元素加在钎料中, 可在 $10^{-2}\sim 10^{-3}\text{Pa}$ 的真空下实现铝的钎焊, 在钎料中加 Mg 的同时加入 0.1% 左右的铋更能改善填充间隙的能力, 对真空度的要求也可降低。

c. 真空钎焊的加热方式以辐射热为主, 由于铝的钎焊温度低, 辐射热效率低, 温度不易均匀, 加热时间长, 汽化的 Mg 蒸气附在炉壁上污染真空炉。

④ 气体保护钎焊 采用惰性气体保护, 钎焊前需对连接表面进行彻底清洗, 炉内气氛需置换然后连续送进, 生产成本低。如果用氮气保护, 需采用无腐蚀性钎剂, 这种方法生产率高, 已获得推广应用。

⑤ 浸渍钎焊 将组装有钎料的待焊件浸入熔融钎剂槽中加热和钎焊。这种方法加热快, 钎焊过程中焊件不发生氧化, 变形小、质量好、生产率高。这种方法仅适用于连续作业的大批量生产, 浸渍钎焊后需清理残留钎剂及残渣, 对生产现场及周围环境有腐蚀及污染。

(6) 特殊钎焊工艺

① 添加界面活性剂的扩散钎焊 在铝合金钎焊接头的界面上涂抹微量的金属镱 (约为 $1\text{mg}/\text{cm}^2$, 镱层厚度为 $1.7\mu\text{m}$) 作为活性剂, 钎缝两侧加压约为 10MPa , 采用高频感应迅速加热至 500°C 并冷至室温, 全部过程要在 $1\sim 2\text{min}$ 内完成。本项技术在空气中直接操作并且不需要钎剂。钎焊后没有出现晶粒间结构的破坏, 所得接头结合紧密, 金相几乎观察不到钎缝的结构, 也不存在一般钎焊所存钎缝的圆角。采用这种工艺钎焊纯铝和 6082 铝合金, 获得接头的抗剪强度达 6082 铝合金母材的 90% , 对接接头抗拉强度达 6082 铝合金母材的 $72\%\sim 80\%$ 。

② 无钎剂扩散钎焊 将锆粉敲碎研细, 筛取 $300\sim 400$ 目的锆粉, 倒入四氯化碳中, 搅起悬浮。趁沉降前将悬浮液适量浇注在清洁的钎焊面上。数次操作, 使锆粉分布均匀。待四氯化碳全部挥发后, 用耐高温的弹性夹具夹紧钎缝两侧母材, 送入炉内加热至 500°C 并保温 1min 。本方法适用于钎焊各种牌号的铝合金, 特别是在补焊断裂的铸铝零件时有特殊的效果。

③ 自钎焊工艺 配制一种专用钎剂, 该钎剂中钎料合金化合物的含量很高。钎焊过程开始, 化合物被还原为金属钎料合金并形成钎缝。在一块平面的铝板上, 涂上质量分数配比为 $1:20:79$ 的 ZnF_2 、 SnF_2 和 $\text{HNR}(\text{OH})_x\text{F}_y$ 的自钎剂 (1080X)。再在上面平行直立一排稍微弯曲的铝翅片。在控温约 250°C 平板加热器上加热。一阵冒泡散烟以后, 取下冷却, 用水冲净铝制散热器。自钎反应不用添加钎料, 钎缝饱满, 圆角平滑。

④ 采用 Nocolok 钎剂-硅粉合成树脂复合涂层 将复合钎焊涂层材料涂覆在铝合金表

面,组成(质量分数)为:硅粉 30%~49%、氟铝酸钾盐 20%~30%,余量为合成树脂。将配制好的涂料利用辊转印法均匀涂覆在经过去脂处理的铝材表面,涂层厚度控制在 40 μm 以下。制备好的涂层经 150~220 $^{\circ}\text{C}$ 干燥处理后,在连续钎焊工艺中表现出了优异的钎焊效果。这一技术使钎焊工艺简单可靠,钎焊接头性能稳定良好。

(7) 铝与异种金属的钎焊

铝能够与其他某些金属钎焊,见表 6.8。钛、镍、钴和铍可以与铝直接钎焊。其他合金可以通过预镀镍来改善合金的流动性,保护表面不被氧化。铜和黄铜不能直接与铝及铝合金钎焊。

表 6.8 铝与其他金属的钎焊性

金属或合金与铝连接	钎焊性	说 明
黑色金属	A	通过在黑色金属上表面镀银或镀铝达到非常好的效果
镍-铬镍铁合金	A	可以直接钎焊或用铝过渡
钛、镍基合金	A	在钎焊前镀铝
铍	B	能够直接与铝的钎焊材料润湿
蒙乃尔(镍铜合金)	B	能够润湿但有脆性
铜和黄铜	C	困难,要求专门的技术来避免脆性;通过铜过渡连接
镁	D	太脆

注:钎焊性:A—所有钎焊方法和工艺都能钎焊;B—采用专门的工艺钎焊,或在特殊的应用前,证明初步的试验或测试,对提高钎焊工艺、性能和钎焊接头,是正确的;C—有限的钎焊性;D—不推荐采用钎焊。

钢和钛部件在真空和露点非常低的惰性气体保护下与铝钎焊在一起,钢和钛部件能够在采用电镀镍、热浸渍镀铝后,应用炉中钎焊、浸渍钎焊、火焰钎焊等方法进行钎焊。在钎焊铝和钢的过程中,在结合面上,钎缝合金化形成脆的金属间化合物层。因此,预热和钎焊时间必须控制在最小值。设计者必须考虑这些金属的热膨胀系数的差异。铝合金与钛合金真空钎焊接头的强度见表 6.9。

表 6.9 铝合金与钛合金真空钎焊接头的强度

母材	钎料	钎焊温度/时间	接头强度/MPa		备 注
			抗拉强度	剪切强度	
3A21	Al-Si-Mg-Bi	600 $^{\circ}\text{C}$ /20min	>87	>108	断于母材
1035+TC4	B-Al88Si	600 $^{\circ}\text{C}$ /5min	—	>65	断于铝合金母材
	B-Al86SiMg	590 $^{\circ}\text{C}$ /5min	—	>64	断于铝合金母材
	B-Al86SiCu	590 $^{\circ}\text{C}$ /5min	—	37.2	—
6A02+TC4	B-Al88SiMg	590 $^{\circ}\text{C}$ /5min	—	79.5	—
	Al-Si-Mg-Bi	590 $^{\circ}\text{C}$ /5min	—	82.7	—
	B-Al60GeSi	570 $^{\circ}\text{C}$ /5min	—	31.7	—
	B-Al67CuSi	580 $^{\circ}\text{C}$ /5min	—	52.3	—
	B-Al86SiCu	590 $^{\circ}\text{C}$ /5min	—	69.1	—

采用感应钎焊、火焰钎焊等方法钎焊铝与铜的接头,其外观质量、钎料的填缝能力均较好,但无论采用锌镉系钎料、铝硅系钎料,还是进口无钎剂钎料,都存在钎料与铜的结合脆性大的问题,接头的剥离试验不合格,无法应用在有强度要求的场合。

由于铝和镁之间的互溶度以及生成了极其脆的铝镁金属间化合物,导致铝和镁不能钎焊。由于复合金属的电位差的差别,复合金属接头需要特殊的处理以确保合适的抗蚀性。抗

腐蚀性可以通过涂油漆、封闭、镀一层耐潮不透水的材料来提高。

6.1.2 铜及铜合金的钎焊

(1) 铜的分类及钎焊特点

① 铜及铜合金的类型 工业生产上铜及铜合金的种类很多,主要是根据化学成分进行分类。常用铜及铜合金可从表面颜色上看出其区别,如紫铜、黄铜、青铜和白铜,但实质上是纯铜、铜-锌、铜-铝、铜-锡合金。

紫铜为铜含量不小于99.5%的工业纯铜;普通黄铜是Cu-Zn二元合金,表面呈淡黄色;凡不以锌、镍为主要组成而以锡、铝、硅、铅、铍等元素为主要组成的铜合金,称为青铜,常用的青铜有锡青铜、铝青铜、硅青铜、铍青铜,为了获得某些特殊性能,青铜中还加少量的其他元素,如锌、磷、钛等;白铜为含镍量低于50%的Cu-Ni合金,如白铜中再加入锰、铁、锌等元素可形成锰白铜、铁白铜、锌白铜。常用加工铜的特性及应用见表6.10。

表 6.10 常用加工铜的特性及应用

代号	产品种类	主要特性	应用举例
T1	板、带、箔	有良好的导电、导热、耐腐蚀和加工性能,可以焊接和钎焊,含降低导电、导热性的杂质较少,不宜在高温(如>370℃)还原性气氛中加工(退火、焊接等)和使用	用于导电、导热、耐腐蚀器材,如电线、电缆、导电螺钉、爆破用雷管、化工用蒸发器、储液器及各种管道等
T2	板、带、箔 管、棒、线	有较好的导电、导热、耐腐蚀和加工性能,可以焊接和钎焊,但含降低导电、导热性的杂质较多,含氧量更高,不能在高温还原性气氛中加工、使用	用于一般铜材,如电气开关、垫圈、垫片、铆钉、管嘴、油管及其他管道等
TU1 TU2	板、带、 管、棒、线	纯度高,导电、导热性极好,加工性能和焊接性、耐蚀性、耐寒性均好	主要用作电真空仪器、仪表器件
TP1	板、带、管	焊接性能和冷弯性能好,可在还原性气氛中加工、使用,但不宜在氧化性气氛中加工、使用。TP1的残留磷量比TP2少,故其导电、导热性较TP2高	主要以管材应用,也可以板、带或棒、线供应。用作汽油或气体输送管、排水管、冷凝管(器)、蒸发管(器)、水雷管、热交换器、火车车厢零件等
TA9.0.1	板、管	铜中加入少量的银,可显著提高软化温度(再结晶温度)和蠕变强度,而很少降低铜的导电、导热性和塑性。银铜时效硬化的效果不显著,一般采用冷作硬化来提高强度。它具有很好的耐磨性、电接触性和耐腐蚀性,如制成电线时,使用寿命比一般铜合金高2~4倍	用于耐热、导电器材,如电机整流子片、发电机转子用导体、点焊电极、通信线、引线、导线、电子管材料等

纯铜在退火状态(软态)下具有高的塑性,但强度低。经冷加工变形后(硬态),强度可提高一倍,但塑性降低几倍。产生了加工硬化的紫铜经550~600℃退火,可使塑性完全回复。焊接结构一般采用软态紫铜。黄铜是指由铜和锌组成的二元合金,并因表面呈淡黄色而得名,强度、硬度和耐蚀能力比紫铜高。

青铜实际上是除铜-锌、铜-镍合金以外所有铜基合金的统称,如锡青铜、铝青铜、硅青铜和铍青铜等,具有较高的力学性能、耐磨性能、铸造性能和耐腐蚀性能,并保持一定的塑性;除铍青铜外,其他青铜的导热性能比紫铜和黄铜低几倍至几十倍,并且具有较窄的结晶区间,因而大大改善了焊接性。青铜中所加入的合金元素量大多控制在 α 铜的溶解度范围内,在加热冷却过程中没有同素异构转变。

白铜是铜和镍的合金,因镍的加入使铜从紫色变成了白色而得名。镍可以无限地固溶于铜,使铜具有单一的 α 组织。按照白铜的性能与应用范围,白铜可分为结构铜镍合金与电工铜镍合金。结构铜镍合金的力学性能、耐蚀性能较好,在海水、有机酸和各种盐溶液中具有较高的化学稳定性,优良的冷、热加工性,广泛用于化工、精密机械、海洋工程中。电工用

白铜是重要的电工材料。在焊接结构中使用的白铜多是含镍 10%、20%、30% 的铜镍合金。

② 钎焊特点 铜及铜合金具有优良的钎焊性,无论是硬钎焊(钎料熔化温度高于 450℃)还是软钎焊(钎料熔化温度低于 450℃)都容易实现。因为铜及铜合金有较好的润湿性,表面的氧化膜也容易去除。只有部分含铝的铜合金由于表面形成 Al_2O_3 膜较难去除,钎焊较困难。铜及铜合金的钎焊性比较见表 6.11。

表 6.11 铜及铜合金的钎焊性比较

材料	类型	钎焊性	特 点
纯铜	全部	极好	可用松香或其他无腐蚀性钎剂进行钎焊
黄铜	含铝黄铜	困难	采用特殊钎剂,钎焊时间尽可能短
	其他黄铜	优良	易于用活性松香或弱腐蚀性钎剂钎焊
锡青铜	含磷锡青铜	良好	钎焊时间尽可能短,钎焊前要消除应力
	其他锡青铜	优良	易于用活性松香或弱腐蚀性钎剂钎焊
铝青铜	全部	困难	在腐蚀性很强的特殊钎剂下钎焊或预先在表面镀铜
硅青铜	全部	良好	需配用腐蚀性钎剂,焊前必须清洗
白铜	全部	优良	易于用弱腐蚀性钎剂钎焊,焊前要消除应力

铜和铜合金钎焊时,如没有采用适当的保护措施,容易产生裂纹、变形和软化等。母材的软化经常出现在钎焊过程中,因为许多铜基合金是以低温热处理、冷加工或两者结合的方式得到这些特性的。随着温度的增加和暴露在高温下的时间增长,软化程度会有所增加。在钎焊区域发生的软化可采取以下方式减少。

- 对除了钎焊面以外的组件冷却。
- 浸入水中。
- 使用湿抹布包裹起来,或提供一个散热器,保持整个部件的温度尽量降低。

另外,使用低熔点钎料、采用短的保温时间也能减轻软化。

由于冷加工、铸造或机械操作引起的残余应力也能够在钎焊过程中引起某些铜合金开裂,不均匀的膨胀和收缩、加热和冷却能够增加应力,所有这些因素的作用,即使相对低的应力,由于高温下存在液体钎料,也足以引起开裂。因此钎焊加热尽量均匀、受控,特别是黄铜、冷加工的磷青铜和硅青铜。

铜及铜合金在钎焊应用中应注意以下几点。

a. 如果母材和钎料熔点接近或相互之间可溶,就不适合采用钎焊。延长加热能够引起母材的过度侵蚀,导致母材熔点范围缩小。例如,用 BCu 钎料钎焊 90Cu-10Ni 合金时,溶解主要发生在钎料的液相线温度以上、液相出现不久时,因此限制了钎焊温度下的保温。

b. 当钎焊磷青铜、硅青铜和镍银时,加热应均匀,以防止在冷加工材料时开裂。使用电阻钎焊、感应钎焊、浸渍钎焊和氧-燃气钎焊方法时,如果加热速度太快,将产生热应力。

c. 有氧铜暴露含氢气中时,能够导致铜的脆性。无论是火焰钎焊,还是还原气氛的炉中钎焊应避免含氢气,以防破坏焊件。氢脆性对钎焊温度和时间比较敏感,温度越高,时间越长,氢脆越危险。

d. 含铅铜合金对铅的偏析敏感。通常大组件的火焰钎焊和炉中钎焊比较困难。铅从铜合金中过度偏析,尤其是铅含量超过 2.5% 的铜合金,由于脆性和钎焊结合不致密,容易导致接头缺陷。

e. 在氢气或惰性气体中炉中钎焊含硫铜,因为硫的蒸发妨碍了铜表面的湿润性,也降

低了铜合金的钎焊性。

(2) 钎料及钎剂

① 钎料 钎焊温度在 620~870℃ 范围的银基钎料和钎焊温度在 704~816℃ 范围内的铜磷钎料是最常使用的钎料。钎料的钎焊温度应比母材的熔化温度足够低, RBCuZn、BCuP、BAg、BAu 钎料能适用于钎焊大多数的铜和铜合金。BCu 钎料的液相线温度与其他使用在铜母材上的钎料相比太高, BCu 钎料能被使用于钎焊铜镍合金。

RBCuZn 钎料能够被用于钎焊铜、铜镍、铜硅和铜锡合金。RBCuZn 钎料不能用于钎焊铝青铜, 因为, 所要求的钎焊温度破坏了这些母材钎剂的功效。因为不需要钎剂, 对大多数铜母材来说, 最常用的是 BCuP 钎料。BCuP 钎料已被用于钎焊 90Cu-10Ni 合金, 但它们在铜镍合金上的用途, 则应通过每种应用中合适的试验来确定。BAg 钎料可以使用在所有的铜基合金上, BAu 钎料主要使用在当需要低的蒸汽压力的电子应用中。

耐腐蚀是选择钎焊钎料的重要因素, 基于此考虑, 常选用铜基钎料。在涉及铜镍、铜硅和铜锡合金的许多场合下, RBCuZn 钎料与这些合金接触不具备足够的耐腐蚀性。例如, 建议不要在高温水系统中或含硫化物的空气中使用 BCuP 钎料。选择钎料的另一个考虑因素是工作温度和分级钎焊工艺中顺序钎焊操作。

软钎焊一般采用锡-铅钎料, 与铜及铜合金有极好的润湿性和工艺性能。用于铜及铜合金钎焊的锡-铅钎料见表 6.12。

表 6.12 用于铜及铜合金钎焊的锡-铅钎料

钎料系列	牌号	推荐间隙/mm	用途
锡铅钎料	HL601	0.05~0.20	钎焊铜及铜合金等强度要求不高的零件
	HL602	0.05~0.20	钎焊纯铜、黄铜
	HL603	0.05~0.20	钎焊铜及铜合金
	HL605	0.05~0.20	钎焊各种铜及铜合金

② 钎剂 钎焊铜及铜合金所用的钎剂见表 6.13。钎剂的形状有粉状、膏状和液状。绝大多数钎剂吸潮性很强, 需严格密封保管。

表 6.13 钎焊铜及铜合金所用的钎剂

牌号	名称	成分/%	特点和用途
QJ101	银钎焊钎剂	KBF ₄ 68~71 H ₃ BO ₃ 30~31	以硼酸盐和氟硼酸盐为主, 能有效清除表面氧化膜, 有很好的浸流性, 配合银基钎料或铜磷钎料使用。在 550~850℃ 范围钎焊各种铜及铜合金以及铜/不锈钢
QJ102	银钎焊钎剂	B ₂ O ₃ 33~37 KBF ₄ 21~25 KF 40~44	以硼酸盐和氟硼酸盐为主, 能有效清除表面氧化膜, 有很好的浸流性, 配合银基钎料或铜磷钎料使用。在 600~850℃ 范围钎焊各种铜及铜合金以及铜/不锈钢
QJ105	低温银钎焊钎剂	ZnCl ₂ 13~16 NH ₄ Cl 4.5~5.5 CdCl ₂ 29~31 LiCl 24~26 KCl 24~26	以氯化物-氟化物为主的高活性钎剂, 在 450~600℃ 范围钎焊铜及铜合金, 特别适用于铝青铜、铝黄铜及其他含铝的铜合金。钎剂腐蚀性极强, 要求焊后对接头进行严格的刷洗, 以防残渣对工件的腐蚀
QJ205	铝黄铜钎焊钎剂	ZnCl ₂ 48~52 NH ₄ Cl 14~16 CdCl ₂ 29~31 NaF 4~6	以氯化物-氟化物为主的高活性钎剂, 在 300~400℃ 范围钎焊铝青铜、铝黄铜以及铜与铝等异种接头。钎剂腐蚀性极强, 要求焊后对接头进行严格的刷洗, 以防残渣对工件的腐蚀

铜及铜合金软钎焊用钎剂分为有机钎剂和弱腐蚀性钎剂两类,见表6.14。其中采用活性松香酒精溶液有机钎剂,焊后不必清除钎剂残渣。

表 6.14 铜及铜合金软钎焊的钎剂

牌号	名称	成分(质量分数)/%	用 途
1	活性有机钎剂	松香 30,酒精 60,醋酸 10	与锡铅钎料配合钎焊各种铜及铜合金
2	活性有机钎剂	松香 22,酒精 76,盐酸苯胺 2	与锡铅钎料配合钎焊各种铜及铜合金
3	弱腐蚀性钎剂	氯化锌 40,氯化铵 5,水 55	与锡铅钎料、锡银钎料及锡锡钎料配合钎焊各种铜及铜合金、铜与不锈钢
4	弱腐蚀性钎剂	氯化锌 6,氯化铵 4,盐酸 5,水 85	与锡铅钎料、锡银钎料及锡锡钎料配合钎焊各种铜及铜合金、铜与不锈钢

③ 气氛 燃气在钎焊大多数铜基合金时是经济实用的保护气氛,但氢含量高的气氛除外,不能使用于有氧铜,因为它们会导致母材产生脆性。除了有氧铜外,分解的氨和氢也是有用的。惰性气体(例如氩气和氮气),也包括氮气,可以使用于所有的铜及铜合金钎焊。

真空气氛适合在钎焊温度下的合金没有高蒸发压力元素(铅、锌等)的铜及铜合金。钎料被限制到含有少量高蒸发压力元素,例如锌和镉的真空等级。对于高真空钎焊,应查阅铜和任何合金元素的蒸发压力-温度曲线,以决定最高允许的钎焊温度。钎焊时通入惰性气体,在炉中建立了一个分压,有助于避免钎料或母材或两者中成分的蒸发。

(3) 钎焊工艺

① 接头设计及表面清理

a. 接头设计 铜及铜合金的钎焊温度足以对它们进行退火,因此,接头的强度是以退火状态为基础设计的。为满足最大的接头强度和安全性,接头间隙控制在0.03~0.13mm范围。然而,在不可能或实现这个建议有困难的情况下,稍微大点的间隙也是允许的,如果允许使用搭接接头,它们能够补偿由于宽的间隙造成的低强度问题。在这种接头形式中,钎焊面积至少达到3倍于最薄件截面积,将有助于满足部件的强度要求。

铜合金的热膨胀系数在一个宽的范围内变化。一般来说,比镍合金、碳钢和铸铁要高低,但比铝合金低。

b. 表面清理 如果接头表面有氧化物、污垢或其他外来的物质,就不能获得牢固的接头。常规溶剂和碱性脱脂工艺适合于清洁铜及铜合金。机械方法(例如钢丝刷和喷砂)能用来去除氧化物。表面氧化物的化学清除,要求合理选择酸洗溶液。使用化学清洗铜表面的典型工艺见表6.15。

表 6.15 使用化学清洗铜表面的典型工艺

母材	清 洗 工 艺
铝青铜	先浸入2%(体积分数)的氢氟酸、3%(体积分数)硫酸与水混合的低温溶液,然后浸入27~49℃的5%(体积分数)的硫酸溶液中。该工艺可以重复进行,直到工件清洁为止
铜硅合金	先浸入热的5%(体积分数)硫酸溶液中,然后在低温2%(体积分数)的氢氟酸与5%(体积分数)硫酸混合溶液中清洗
黄铜	使用低温5%(体积分数)的硫酸溶液
纯铜	浸入到低温5%~15%(体积分数)的硫酸溶液中
含铍青铜	①浸入20%(体积分数)的硫酸溶液中,温度71~82℃,然后水洗 ②快速浸渍(30s)到30%(体积分数)的冷硝酸溶液中,随后立即彻底水洗
含铬铜	浸入5%(体积分数)的热硫酸中进行酸洗,然后在15~37g/L重铬酸钠与3%~5%(体积分数)硫酸的混合液中酸洗,随后进行彻底水洗

钎焊前,在含有强氧化物形成元素的铜合金上镀铜,有利于简化钎焊工艺,用于镀铜的镀层厚度为0.03mm,用于镀铜、硅青铜、铝青铜的镀层厚度为0.013mm。

② 组装 组装工艺应该在所有接头面积都清洗后进行。当使用钎剂时,要将钎剂涂抹在刚刚清洗的接头表面上。在钎焊过程中,一些辅助的步骤能够被合并。例如,当钎焊可热处理母材时,与适当的热处理工艺结合即可获得理想的接头力学性能。这个工艺可以应用到镀铜和铬铜的钎焊中,但不能钎焊铅铜。这种合并的操作适合于可以固溶退火的钎料,只有当钎焊组件能够迅速地冷却,达到固溶热处理条件下的微观结构和所需要的特性,这种操作才有实际意义。

为了避免损害钎焊接头,组件在钎焊、淬火和随后的时效热处理中必须被适当地支撑。在实施操作之前,应该检查固溶热处理和时效要求的温度数据。

③ 钎焊方法及工艺要点

a. 无氧、高导电铜和脱氧铜 常采用炉中钎焊或火焰钎焊方法。在高温下,有氧铜对于氧的迁移或氢脆非常敏感,甚至是两者兼而有之。因此,有氧铜应用在惰性气体、氮气或真空气氛下的炉中钎焊来完成。火焰钎焊应该采用中性或微氧化焰,铜磷或银铜磷钎料在铜上有自钎剂作用。然而在大的组件中钎剂是有作用的,大件钎焊时间延长,会引起额外的氧化。由于腐蚀侵袭的危险,使用的含磷钎料的钎焊接头不能长期暴露在高温下的水中和含硫的气氛中。

如果使用铜锌钎料,则应仔细操作,不能过热,在接头中锌的蒸发会引起砂眼。当采用火焰钎焊时,氧化焰将减少锌的蒸发。

当钎焊接头具有超过较薄部件厚度3倍的搭接面积时,退火后的铜搭接接头组件能够满足强度要求。实际上,脱氧铜中搭接接头提高了具有较少搭接长度的母材的最大强度。搭接接头长度超过壁厚的2倍,快速拉断时,断裂常出现在母材上。

当被加工试样接头面遭到破坏(缩小搭接长度),一般来说,裂纹将会部分或全部穿过平行于接头结合面的母材中的一个平面。可以解释为,在室温条件下,BAg和BCuP钎料金属强度要比退火后的母材强。在升高温度时,钎料强度的下降速度比同样情况下的铜更快,最终在钎料中发生开裂。钎料的最高工作温度见表6.16。

表 6.16 钎料的最高工作温度

钎料金属分类	工作温度/℃	
	连续工作	断续工作
BCuP	150	200
BAg	150	200
BAu	425	540
RBCuZn	200	315

b. 黄铜 所有的黄铜都可以用BAg和BCuP钎料钎焊,较高熔点的黄铜(低锌)也能够使用RBCuZn钎料钎焊。

即使在保护气氛中,也可以使用钎剂以改善钎料的润湿。钎剂还能用于减少锌的蒸发。当加热到400℃以上时,黄铜中的锌趋向于蒸发损失掉,这种损失可以通过在炉中钎焊过程将钎剂涂抹到工件表面,或在火焰钎焊中使用氧化焰来减少。黄铜也受到裂纹的影响,因此要仔细、均匀地加热。尖角和引起应力集中的截面变化和产生热应力的现象都应该避免。

含有铝和硅的黄铜要求的处理类似于铝青铜或硅青铜。铅加入到黄铜中改善切削性能,能够与钎料合金化并且引起脆性。当铅的含量超过2%~3%时,将增加钎焊的难度。为了在钎焊过程中保持好的流动性和润湿性,需要用钎剂将铅黄铜完全覆盖,以防止铅氧化物和

残渣的出现。高铅黄铜快速地加热能引起裂纹。在钎焊之前进行应力释放退火,也可以缓慢、均匀地加热和冷却,将减少这种裂纹的倾向。

c. 磷青铜 铜锡合金在应力条件下易产生裂纹。在钎焊之前释放应力或对部件退火是很好的经验。钎焊过程中对焊件进行支撑也能减小接头受力。采用缓慢的加热速度可防止热冲击。当锡含量较高或采用含较多铅的添加剂时,钎焊过程中需要采用钎剂做充分的防护。所有的磷青铜可以使用 BAg 和 BCuP 钎料钎焊。低锡的磷青铜也能通过 RBCuZn 钎料进行钎焊。

磷青铜有时也采用金属粉块形式,在钎焊以前,这些粉块需要使用水基或油基胶状石墨悬浮液做粉刷表面的预处理,然后在低温下烘焙、清洗并且脱脂。这个程序可封住小孔,以便实行钎焊。

d. 铜铝合金(铝青铜) 在钎焊温度下,超过 8% 铝含量的合金,由于难熔铝氧化物的形成,会带来钎焊的困难。然而,这个问题可以通过在待钎焊的表面电镀一层 0.013mm 的铜来解决。炉中钎焊非电镀表面,钎剂也可以与保护气氛同时使用。

e. 铜硅合金(硅青铜) 铜硅合金应被清洁,在钎焊之前电镀铜或涂上一层钎剂以防止形成难熔的氧化硅。推荐采用机械方式清理。如前所述,对于轻的氧化程度,铜硅合金可被酸洗,一般使用含硅钎料。

硅青铜易受到钎料的晶间渗入,在应力下造成热脆性,在钎焊之前应释放应力,钎焊温度应在 760℃ 以下。

f. 铜镍合金 铜镍合金一般采用 BAg 钎料钎焊。在使用 BCuP 类钎料之前,必须就性能和微观结构对母材做出充分评价,在钎焊过程中有可能形成脆的磷化镍。母材必须是没有硫和铅,这些元素在钎焊循环中会引起裂纹。可以使用标准溶解剂和碱性脱脂程序。氧化物可以通过砂布清除或在 5% 体积浓度的硫酸热溶液中酸洗,然后立即进行彻底的清水冲洗。

在应力条件下,铜镍合金对熔化的钎料所引起的晶间渗入很敏感,为防止裂纹,在钎焊之前应释放应力,在钎焊过程中不应引入应力。

g. 铜-镍-锌合金(镍银) 铜-镍-锌合金可以容易地采用钎焊黄铜的工艺钎焊,当使用 RBCuZn 钎料时,因为相对高的钎焊温度,需要仔细操作,这些合金易受到钎料的晶间渗入,除非它们在钎焊以前释放应力。这些合金热传导性不高,趋向于局部过热。建议缓慢和均匀加热,使用充分多的钎剂以防止氧化。

h. 特殊铜合金 含有少量银、铅、碲、硒或硫(一般不超过 1%)的铜合金容易被自钎剂钎料 BCuP 钎焊。如果使用钎剂,会改善润湿性。

高强度的铍铜合金(2%的铍)能够在炉中钎焊并且同时在 788℃ 进行固溶处理,在稍低的温度(760℃)下钎料凝固,然后组件在水中淬火,在 316~343℃ 时效处理。常采用银铜共晶钎料 BAg72Cu。

另一个快速加热(要求低于 1min)的方法是在低于固溶退火温度以下进行固溶退火材料的钎焊。钎焊后不做重新退火的时效处理。充分快速的加热速度通过感应钎焊获得。

高电导率铍铜合金(0.5%铍),退火温度 927℃,在 454~482℃ 温度范围内产生沉淀硬化,在时效条件下使用 BAg45CuZnCd 或 BAg50CuZnCd 银钎料容易钎焊。

铭铜和铅铜在 482℃ 时效,随后在 899~1010℃ 温度下固溶退火并冷加工。使用含银钎料和含氟化物钎剂的钎焊,最好安排在固溶退火和冷加工之后、时效硬化之前进行。在这个工艺之后,母材的热处理特性低于正常值。

④ 焊后清理及接头检查 残留的钎剂是腐蚀源,必须予以清除。这些残留物可以浸入到热水中即可疏松或溶解。氧化物的去除要求使用机械方法(例如钢丝刷)或具有适当溶解

作用的酸。

大多数钎焊接头的检查方法,可用于铜及铜合金钎焊接头。具体选择取决于接头的设计和运用的需求。

当使用一些包含锌和镉的钎料,含有氯化物的钎剂,一些含有铍、铅、锌的母材时,必须进行适当的通风,以保护操作工。

(4) 铜与铝及其合金的钎焊

铜与铝的钎焊早已引起人们的关注。近年来,新型钎料、钎剂的出现,推动了铜与铝钎焊技术的进步,使铜/铝复合结构得到应用。

① 钎料的选用 为了获得良好的铜/铝钎焊接头质量,对钎料的要求是:适宜的熔点、良好的润湿性和流动性、抗腐蚀性及导电性等。铜具有良好的可钎焊性,因此对铜/铝钎焊的钎料选择,主要考虑对铝的可钎焊性。

从铜与铝及铝合金的熔点、电极电位和可钎焊性来看,一般采用锌基钎料,并通过加入 Sn、Cu、Ca 等元素来调整铜与铝的接头性能。在 Sn 中加入 10%~20% 的 Zn 作为铜与铝钎焊的钎料,可提高钎焊接头的力学性能和抗腐蚀性能。

目前用于钎焊铝与铜的钎料主要有低温钎料和高温钎料两大类。低温钎料主要是锌基钎料和锡基钎料;高温钎料主要是铝基钎料。铜与铝低温钎焊的钎料成分见表 6.17。铜与铝高温钎焊的钎料成分见表 6.18。

表 6.17 铜与铝低温钎焊的钎料成分

化学成分/%						熔点或工作温度/℃	应用情况及钎剂	钎料代号
Zn	Al	Cu	Sn	Pb	Cd			
50	—	—	29	—	21	335	Cu-Al 导线配合 QJ203	—
58	—	2	40	—	—	200~350		HL501
60	—	—	—	—	40	266~335	配合 QJ203	HL502
95	5	—	—	—	—	382,工作温度 460	Cu-Al 钎剂	—
92	4.8	3.2	—	—	—	380~450	Cu-Al 钎剂	—
10	—	—	90	—	—	270~290	Cu-Al 钎剂	—
20	—	—	80	—	—	270~290	Cu-Al 钎剂	—
99	—	—	—	1	—	417	Cu-Al 钎剂	—

表 6.18 铜与铝高温钎焊的钎料成分

钎料牌号	化学成分/%	钎焊温度/℃	钎焊方法
BAI92Si(HLAlSi7.5)	Si6.8~8.2,Cu0.25,Zn0.2,其余 Al	599~621	浸渍、炉中
BAI90Si(HLAlSi10)	Si9.0~11.0,Cu0.3,Zn0.1,其余 Al	588~604	浸渍、炉中
BAI88Si(HLAlSi12)	Si11.0~13.0,Cu0.3,Zn0.2,其余 Al	582~604	浸渍、炉中、火焰
BAI86SiCu(HLAlSiCu10-4)	Si9.3~11.7,Cu3.3~4.7,Zn0.2,其余 Al	585~604	火焰、炉中、浸渍
BAI90SiMg(HLAlSiMg7.5-1.5)	Si6.8~8.2,Zn<0.20,Mg2.0~3.0,其余 Al	599~621	真空炉中
BAI89SiMg(HLAlSiMg10-1.5)	Si9.0~10.5,Zn<0.20,Mg0.2~1.0,其余 Al	588~604	真空炉中
BAI86SiMg(HLAlSiMg12-1.5)	Si11.0~13.0,Zn<0.20,其余 Al	582~604	真空炉中

锌基钎料有自然老化现象。锌基钎料炼制成条状,室温下放置 6 个月后,发现表面发黑,断面失去光泽,重熔后产生大量渣状物,这是由于电化学腐蚀和晶间腐蚀所致。提高钎

料成分的纯度(如用分析纯锌和化学纯铅配制),自然老化现象就不显著了。

② 钎剂的选用 铜与铝钎焊除刮擦钎焊和超声波钎焊外,其他的钎焊过程都需要有钎剂的配合。例如,锌液与铝的润湿性很差,锌液滴在铝表面上聚集成球状,因此用纯锌作钎料须用无机盐类钎剂来改善其润湿性。

钎剂的熔点要低于钎料的熔点,并易脱渣清除。钎剂分为无机盐类和有机盐类两大类,应根据钎料及钎焊件的要求适当选择。铜与铝钎焊常用的钎剂见表 6.19。钎焊熔剂一般应根据配合钎料来选择使用。

表 6.19 铜与铝钎焊常用的钎剂成分

主要成分/%								熔点/℃
LiCl	KCl	NaCl	LiF	KF	NaF	ZnCl ₂	NH ₄ Cl	
35~25	余	—	—	8~12	—	8~15	—	420
—	—	—	—	—	5	95	—	390
16	31	6	—	—	5	37	5	470
—	—	SnCl ₂ 28	—	—	2	55	NH ₄ Br 15	160
—	—	—	—	—	2	88	10	200~220
—	—	10	—	—	—	65	25	220~230

③ 钎焊实例

a. 低温钎焊 某单位研制出简单、经济的铜/铝钎焊方法,即用松香酒精溶液作钎剂,以锌基钎料低温钎焊铝及铜导线,获得成功并得到推广应用。松香的成分是松香酸 $C_{20}H_{30}O_2$, 熔化温度是 173℃, 在 400℃ 左右很快挥发,能微量溶解氧化铝和氧化铜层。锌基钎料与松香酒精配合,采用浸渍钎焊的方式钎焊铜与铝,这种方法的优点如下。

- 经济易得、成本低。
- 避免了钎剂腐蚀的可能性。
- 简化了钎焊工艺,提高生产率。

锌基钎料的成分是:分析纯锌 96%~98%,化学纯铅 2%~4%。钎剂配方是:松香与无水酒精比例大于或等于 1。钎料的钎焊温度为 420~460℃。

将涂有松香酒精溶液的铜/铝接头快速浸入 440℃ 左右的钎料中,松香酸在 400℃ 左右具有迅速挥发的性质,会产生急剧的物理膨胀,形成爆炸力。这种爆炸力在液体金属中能形成单位能量很大的冲击波,使氧化铝膜破裂。氧化铝膜的微观结构呈蜂窝状,加上刮削时形成的沟槽和裂纹,都是存留松香酸液的缝隙,爆炸力越大,越有利于使氧化膜破裂。

氧化铝与铝基体的结合力很大,光靠溶解和爆破作用还不足以彻底去除氧化膜。浸渍过程中,由于锌中加入铅,增加了铅与锌基钎料之间的电位差,可增加铝被熔蚀的速度,使残余的氧化铝膜进一步脱落。

纯锌中铅的加入量 1%~4%,Pb 在 Zn 中起机械分离 Zn 和细化晶粒的作用。

b. 中温钎焊

- 采用的钎焊材料:Zn-Sn 钎料,压制成厚度为 0.7~1.0mm 的片状。
- 焊前准备:铝件和铜片去油、去氧化膜。Zn-Sn 钎料去油、去氧化膜。
- 装配:用不锈钢板按铝—钎料—铜片的次序组装、夹紧。可分层叠放,中间用不锈钢板隔开,用紧固螺母拧紧。

- 装炉钎焊,步骤如下:装炉,抽真空;真空度到 10^{-2} Pa 以后,启动加热;升温速度

10~20℃/min (酌情调整), 在 150℃和 300℃时各保温 10min, 然后连续升温到 425℃, 保温 15min 后, 冷却; 降温, 冷却到 400℃以下, 关闭加热装置, 冷却到 300℃以下, 填充氮气加快冷却速度, 冷却到 100℃以下, 打开炉门。

c. 高温钎焊

- 采用的钎焊材料: AlSi12 钎料, 母材采用纯铝或防锈铝。
- 焊前准备: 铝件和铜片去油、去氧化膜。钎料由丝状压制成厚度约 1mm 的回形片状, 去油、去氧化膜。
- 装配: 用不锈钢板按铝—钎料—铜片的次序组装、夹紧, 分层叠放, 用紧固螺母拧紧。
- 装炉钎焊, 步骤如下: 装炉, 抽真空; 真空度到 10^{-2} Pa 以后, 启动加热; 升温速度 10~20℃/min (酌情调整), 在 150℃保温 10min, 350℃和 540℃各保温 5min, 然后连续升温到 624℃, 保温 6min 后, 冷却; 降温, 冷却到 600℃以下, 关闭加热装置, 冷却到 450℃以下, 填充氮气加快冷却速度, 冷却到 100℃以下, 打开炉门。

6.1.3 钛及钛合金的钎焊

(1) 钛及钛合金的分类及性能

① 工业纯钛 工业纯钛的性质与其纯度有关, 纯度越高, 强度和硬度越低, 塑性越高, 越容易加工成形。钛在 885℃时发生同素异构转变。在 885℃以下, 为密排六方晶格结构, 称为 α 钛; 在 885℃以上, 为体心立方晶格结构, 称为 β 钛。钛合金的同素异构转变温度则随着加入的合金元素的种类和数量的不同而变化。工业纯钛的再结晶温度为 550~650℃。

工业纯钛中的主要杂质有氢、氧、铁、硅、碳、氮等。其中氧、氮、碳与钛形成间隙固溶体, 铁、硅等元素与钛形成置换固溶体, 起固溶强化作用, 显著提高钛的强度和硬度, 降低其塑性和韧性。氢以置换方式固溶于钛中, 微量的氢即能够使钛的冲击韧性急剧降低, 增大缺口敏感性, 并引起氢脆。

工业纯钛根据其杂质 (主要是氧和铁) 的含量以及强度差别分为 TA1、TA2、TA3 三个牌号。随着工业纯钛牌号的顺序数字增大, 其杂质含量增加, 强度增加, 塑性降低。

工业纯钛容易加工成形, 但在加工后会产生加工硬化。为恢复塑性, 可以采用真空退火处理, 退火温度为 700℃, 保温 1h。工业纯钛具有很高的化学活性。钛与氧的亲合力很强, 在室温条件下就能在表面生成一层致密而稳定的氧化膜。由于氧化膜的保护作用, 使钛在大气、高温气体 (550℃以下)、中性及氧化性介质、不同浓度的硝酸、稀硫酸、氯盐溶液以及碱溶液中都有良好的耐蚀性, 但氢氟酸对钛具有很大的腐蚀作用。工业纯钛的化学活性随着加热温度的增高而迅速增大, 并在固态下具有很强的吸收各种气体的能力。

工业纯钛是一种常用的 α -Ti 合金, 具有良好的耐腐蚀性、塑性、韧性和焊接性。其板材和棒材可以用于制造 350℃以下工作的零件, 如飞机蒙皮、隔热板、热交换器、化学工业的耐蚀结构等。

② 钛合金 工业纯钛的强度还不高, 在其中加入合金元素后便可以得到钛合金, 其强度、塑性、抗氧化等性能显著提高, 并使钛合金的相变温度和结晶组织发生相应的变化。

钛合金根据其退火组织可分为三大类: α 钛合金、 β 钛合金和 $\alpha+\beta$ 钛合金。其牌号分别以 T 加 A、B、C 和顺序数字表示。TA4~TA10 表示 α 钛合金, TB2~TB4 表示 β 钛合金, TC1~TC12 表示 $\alpha+\beta$ 钛合金。钛及钛合金的力学性能见表 6.20。

表 6.20 钛及钛合金的力学性能

合金 牌号	材料 状态	板材厚度 /mm	室温力学性能 \geq				高温力学性能		
			抗拉强度/MPa	伸长率/%	规定残余伸长 应力/MPa	弯曲角/(°)	试验温度 /°C	抗拉强度 /MPa	持久强度 /MPa
TA1	退火	0.3~2.0	370~530	40	250	140	—	—	—
		2.1~10.0		30		130			
TA2	退火	0.3~1.0	440~620	35	320	100	—	—	—
		1.1~2.0		30		100			
		2.1~5.0		25		80			
		5.1~10.0		25		—			
		10.1~25.0		20		—			
TA3	退火	0.3~1.0	540~720	30	410	90	—	—	—
		1.1~2.0		25		90			
		2.1~5.0		20		80			
		5.1~10.0		20		—			
TA6	退火	0.8~1.5	685	20	—	50	350 500	420 340	390 195
		1.6~2.0		15		40			
		2.1~10.0		12		40			
TA7	退火	0.8~1.5	735~930	20	685	50	350 500	490 440	440 195
		1.6~2.0		15		50			
		2.1~10.0		12		40			
TB2	淬火	1.0~3.5	≤ 980	20	—	120	—	—	—
TC1	退火	0.5~1.0	590~735	25	—	100	350 400	340 310	320 295
		1.1~2.0		25		70			
		2.1~10.0		20		60			
TC2	退火	0.5~1.0	685	25	—	80	350 400	420 390	390 360
		1.1~2.0		15		60			
		2.1~10.0		12		50			
TC3	退火	0.8~2.0	880	12	—	35	400 500	590 440	540 195
		2.1~10.0		10		30			
TC4	退火	0.8~2.0	895	12	830	35	400 500	590 440	540 195
		2.1~10.0		10		30			

(2) 钛及钛合金的钎焊特点

钛及钛合金的钎焊特点主要表现在以下几个方面。

① 表面氧化物稳定 钛对氧的亲合力很大,具有强烈氧化倾向,从而在其表面生成一层坚韧稳定的氧化膜。钎焊前必须经过非常仔细的清理去除,并且直到钎焊完成都要保持这种清洁状态。

② 具有强烈的吸气倾向 钛和钛合金在加热过程中会吸收氧气、氢气和氮气,吸气的结果使合金的塑性、韧性急剧下降,所以钎焊必须在真空或干燥的惰性气氛保护下进行。

③ 组织和性能的变化 纯钛和 α 型钛合金不能进行热处理强化,因此钎焊工序对其性能影响较小。但当加热温度接近或超过 $\alpha \rightarrow \beta$ (或 $\alpha + \beta \rightarrow \beta$)转变温度, β 相的晶粒尺寸会急剧长大,组织显著粗化,随后在冷却速度较快的情况下形成针状 α' 相,使钛的塑性下降。

β 型钛合金在退火状态时不受钎焊的影响,但是当在热处理状态或以后要热处理时,钎焊温度可能对其性能产生重大影响。当在固溶处理温度下钎焊时,可获得最佳韧性,随着钎焊温度升高,母材的韧性会降低。 $\alpha + \beta$ 型钛合金的力学性能随热处理与显微组织的变化而变化。锻造的 $\alpha + \beta$ 型钛合金一般制成等轴晶的双相组织以获得最高的韧性。为保持这种显微组织,钎焊温度不宜超过 β 转变温度。钎焊温度越低,对母材性能的影响越小。

④ 形成脆性化合物 钛可与大多数金属形成脆性化合物, 用来钎焊其他金属的钎料一般均能同钛形成化合物, 使接头变脆, 基本上不适用于钎焊钛及钛合金, 因此选择钎焊钛合金的钎料存在一定困难。

(3) 钎料和钎剂

钛及钛合金很少用软钎料钎焊, 但在一些特殊场合, 也可采用锡铅钎料、镉基钎料和锌基钎料, 钎焊接头的抗剪强度为 29~49MPa。

钎焊钛及钛合金的硬钎料主要有银基、铝基、钛基或钛铅基几大类。银基钎料是最早用来钎焊钛及钛合金的钎料, 主要用于使用温度较低 (低于 540℃) 的构件, 有纯 Ag、Ag-Cu、Ag-Li、Ag-Mn、Ag-Cu-Ni、Ag-Al、Ag-Pd-Ga 等合金系。Ag 对 Ti 的润湿性很好, 在钎缝的界面区形成金属间化合物 TiAg, 与 Ti 和其他金属的金属间化合物相比脆性较小, 但其线胀系数同钛的线胀系数差别较大, 在应力作用下易产生裂纹, 故用银钎料钎焊的接头强度不是很高。Ti-Cu 金属间化合物呈脆性, 所以银基钎料中 Cu 含量应保持低值。添加 Li 有助于加速扩散和使银基钎料与 Ti 产生合金化。表 6.21 列出了银和银基钎料真空钎焊的 TA7 钛合金的接头强度。

表 6.21 银和银基钎料真空钎焊的 TA7 钛合金的接头强度

钎料	钎焊工艺参数	接头抗拉强度/MPa	接头抗剪强度/MPa
Ag	980℃×5min	—	117.8~166.5
HBAg72Cu	900℃×5min	274~304	108~117.2
HBAg72CuNiLi	880℃×5min	274~305	88.1~156.5
68Ag-28Cu-4Sn	870℃×5min	284~314	128.1~188
HLAgMn15	1000℃×5min	274~314	156.5~176.2

Al 可降低 Ag 的熔点, 且 Al 同 Ti 形成的化合物脆性不大, 所以银铝钎料是性能较好的一种钎料, 其典型成分为 Ag-5Al (质量分数), 在 900℃钎焊具有良好的填充间隙能力, 对母材无不良影响。在 Ag-5Al 钎料中加入质量分数为 0.5% 左右的 Mn, 可显著提高钎料的抗腐蚀性, 用 Ag-5Al-0.5Mn 钎料钎焊钛合金, 钎焊温度范围为 870~930℃, 在钎缝与钛合金界面的扩散层是塑性较好的 Ag-Al-Ti 固溶体, 其接头具有良好的抗盐水喷射应力腐蚀性能和优良的剪切强度。这种钎料钎焊 Ti-6Al-4V, 获得的接头抗剪强度为 137~206MPa, 即使在 400℃接头的抗剪强度仍可保持在 97MPa, 该钎料最适合于钛合金薄壁构件 (如散热器、蜂窝结构等) 的钎焊。

铝基钎料非常适合钎焊钛合金散热器、钛蜂窝和层板结构, 原因如下。

① 铝基钎料钎焊温度低, 远低于钛合金 β 转变温度, 基体不会软化, 对固溶时效钛合金只要钎焊温度选择合适就可以保持其性能不变, 同时可大大简化钎焊夹具材料及结构的选择, 提高夹具使用寿命。

② 与钛基体相互作用小, 无明显熔蚀和扩散, 生成脆性化合物的倾向小。

③ 钎料塑性好, 容易加工, 也可将钎料和母材轧制在一起, 便于蜂窝结构等的装配。

纯铝、铝锰 (3A21)、铝镁 (5A06) 合金均可用于钛合金的钎焊。需在更低温度下钎焊时可选用 Al-Si、Al-Cu、Al-Cu-Si 系铝钎料。钛基钎料主要是 Ti 或 Ti-Zr 和 Ni、Cu、Be 组成的低熔点共晶合金, 有 Ti-Cu-Ni、Ti-Zr-Be、Ti-Zr-Cu-Ni 等系列。与银基、铝基钎料相比, 钛基钎料钎焊接头强度更高, 耐腐蚀性和耐热性更好, 在盐雾环境、硝酸和硫酸中耐蚀性尤为优良。但由于这类钎料中基本上都含有与 Ti 具有强烈作用的 Cu、Ni 元素, 钎焊时会快速扩散到基体中并与 Ti 反应造成对基体的熔蚀和形成脆性的扩散层, 因此不利于薄壁

结构的钎焊。另外,钛基钎料本身比较脆,加工性能差,主要是采用真空或惰性气体保护非晶态制箔技术制成箔带使用,或以粉末状态使用,也有采用金属箔片构成叠层钎料使用。

叠层钎料的成分取决于各种金属箔材的厚度比,按照一定厚度比可制成满足一定重量比的叠层钎料。表 6.22 是采用 Ti-14Cu-14Ni 和 Ti-13Cu-14Ni-0.26Be 叠层钎料钎焊 TC4 钛合金接头的性能,同时表中还列出了 Ag-5Al-1Mn 钎料钎焊接头的性能以进行比较。从表中可见,两种叠层钛基钎料钎焊接头的强度明显高于 Ag-5Al-1Mn 钎料钎焊接头,且具有良好的抗氧化和抗盐雾腐蚀性能。扩散处理后接头进一步改善,与 TC4 基体性能相当。

表 6.22 叠层钎料钎焊 TC4 钛合金接头的力学性能

钎料	钎焊及扩散焊处理工艺	抗剪强度/MPa				抗拉强度/MPa	冲击韧性/(J·cm ⁻²)
		室温			430℃		
		未腐蚀	430℃×100h 氧化	120h 盐雾腐蚀			
Ti-14Cu-14Ni	900℃×15min 钎焊	310	302	305	294	372	28
	钎焊+920℃×2h 扩散处理	—	—	—	—	870	32
	钎焊+920℃×6h 扩散处理	—	—	—	—	1100	44
Ti-13Cu-14Ni-0.26Be	950℃×15min 钎焊	371	312	310	290	—	3
	钎焊+920℃×2h 扩散处理	464	—	—	—	905	40
Ag-5Al-1Mn	钎焊	199	199	157	85	—	—

采用钛基钎料钎焊钛合金,可以获得较高的接头强度,甚至达到或接近母材强度,但钛合金钎焊接头一般均呈现明显的脆性。可通过减小钎焊接头间隙和控制钎料用量,并配合施加一定的压力减缓钛合金钎焊接头的脆性,但其适用性有限,而从钎料成分设计上降低钎焊接头脆性更有效。如在 Ti-Zr-Cu-Ni 系钎料中加入元素 Co,并控制 Cu、Ni、Co 三种元素的总含量,或在 Ti-Zr-Cu-Ni 系钎料中加入元素 Co 的同时加微量稀土元素。

(4) 钎焊工艺

① 焊前表面准备 钛及钛合金在受热状态下极易与氧气、氢气、氮气以及含有这些气体的物质发生反应,从而在表面生成一层以氧化物为主的表面层,钎焊时会阻碍钎料的流动、润湿,因此钎焊前必须将其去除。主要清理方法如下。

a. 表面除油 可使用非氟化物的溶剂,如丙酮、丁酮、汽油和酒精进行整体或局部擦洗除油,最好采用超声波清洗;或者在用上述方法除油后,再用氢氧化钠+无水碳酸钠+磷酸三钠+硅酸钠水溶液作进一步的除油。

b. 化学清理 目的主要是去除氧化膜。氧化膜较薄时可用硝酸+氢氟酸水溶液进行酸洗;氧化膜很厚时,则应先用氢氧化钠+碳酸氢钠水溶液进行碱洗,然后再在硝酸+盐酸+氢氟酸水溶液或硝酸+盐酸+氟化钠水溶液中酸洗。

c. 机械清理 化学清理有困难钎焊件,可用细砂纸或不锈钢丝刷打磨清理,也可用硬质合金刮刀刮削待焊表面。

需要在热处理状态下使用的 β 型钛合金构件焊后应按母材热处理制度进行热处理。另外有时为了提高钎焊接头的性能,需要在焊后进行扩散处理。

② 钎焊方法 钛及钛合金的钎焊最好在氩气保护或真空中进行。在氩气或真空中钎焊时,可以采用高频加热、炉中加热等方法,加热速度快,保温时间短,界面区的化合物层薄,接头性能好,但必须控制钎焊温度和保温时间,使钎料流满间隙。

a. 点焊-钎焊组合焊接 焊接钎焊是 20 世纪 70 年代初期发展起来的用于钛合金连接的

一项先进工艺。它将电阻点焊与钎焊结合起来,可形成具有良好静载强度和疲劳强度的搭接接头,同时使生产成本降低,并有一定的减重效果。

焊接钎焊时,电阻点焊主要用来使零件校直定位,并为随后钎焊获得完整的接头保持适当的配合间隙;钎焊则是使钎料通过毛细作用流入接头,进一步提高接头的性能和减小点焊接头的应力集中。具体实施方法有两种:一种是预穿钎料孔的焊接钎焊法,即先在钎料箔带上穿孔,其孔径略大于预计的点焊焊核直径,然后将穿孔的钎料置于被焊钛板之间进行点焊,使焊点正好通过钎料箔带上的孔,最后在真空或保护气氛炉中进行钎焊;另一种方法是利用钎料毛细流动的焊接钎焊法,即先将钛板点焊在一起,然后将钎料置于搭接接头旁边再进行炉中钎焊,钎焊时,钎料通过毛细作用流入接头间隙内而形成连续、高强度的接头。银基、铝基和钛基钎料均可用于焊接钎焊。

采用厚度为 0.1mm 的铝锰合金箔作为钎料焊接钎焊的 TC4 钛合金单面搭接接头,在室温到 290℃ 温度范围内,剪切强度约为纯钎焊和点焊接头的强度之和;室温疲劳强度与钎焊接头相当,是点焊接头的 3 倍;接头 290℃ × 500h 的持久强度是钎焊接头的 2 倍,比点焊接头至少高 15%。焊接钎焊的带桁条的蒙皮板结构最大压缩强度比同样结构的铆接板高 1.5 倍,而弯曲强度高 1.6~2.25 倍。

b. 液相扩散钎焊 液相扩散钎焊是 20 世纪 70 年代初期开发的一种钛合金连接工艺。其原理是在工件结合面之间加入能与基体金属反应,生成一种或几种共晶成分的中间金属或合金,在连接温度下,中间层金属或合金本身并不熔化,但加热时它会与基体金属发生接触反应,在原位置生成低熔点共晶,共晶液相的形成又起到扩散桥的作用加速扩散过程,使靠近界面区域逐层达到共晶成分而液化,直到中间金属或合金完全扩散并溶入基体中,形成成分均匀、组织基本一致的牢固接头。液相扩散钎焊又称薄膜扩散钎焊、共晶钎焊或接触反应钎焊。

液相扩散钎焊所用中间金属或合金本身在连接温度下并不熔化,液相通过与基体扩散反应生成,接头形成过程中在一段时间内存在一定量的液相,可改善连接面之间的接触状态并促进扩散,因而对连接面的表面粗糙度要求较固态扩散焊低得多,而且只需施加很小的压力或不加压,操作灵活,且接头力学性能可以达到基体金属水平。

液相扩散钎焊所用的中间层材料通常为可与 Ti 形成低熔点共晶的 Cu 与 Ni,可直接电镀或气相沉积在连接面上或以金属箔的形式使用。液相扩散钎焊的钛合金接头具有较好的力学性能,如采用厚度为 12.7nm 的铜箔作为中间金属,在 1038℃ 下保温 60min,施加 0.1MPa 的焊接工艺下真空感应加热焊接 TC4 钛合金,接头剪切强度为 545MPa,与固态扩散焊接头相当;接头在 316℃、3.5% NaCl 水溶液中暴露 500h 和 1000h 后,其室温拉伸强度为 1000~1034MPa,与未腐蚀状态相比,强度值不仅没有降低,反而有所升高;在 413MPa 应力水平下,接头疲劳寿命大于 10^7 次循环,但应力高于 413MPa 时,疲劳寿命稍低于基体。对液相扩散钎焊的带肋蒙皮板进行室温压缩试验时,即使在板的翘曲区也未发生接头的分离现象,表明接头具有良好的塑性。

(5) 钛铝金属间化合物的钎焊

钛铝金属间化合物材料具有一系列优异的性能,是航空航天、汽车、石油化工领域中极具应用前景的先进轻型结构材料,主要有 Ti_3Al 和 $TiAl$ 。 Ti_3Al 为密排六方有序 DO_{19} 超点阵结构,高温下 (800~850℃) 具有良好的高温性能,密度较小 ($4.1\sim 4.7g/cm^3$),弹性模量较高 (110~145GPa),与镍基高温合金相比可减轻重量 40%。美国已将 Ti_3Al 用于制造喷气涡轮发动机上的尾喷燃烧器,其主要问题是室温塑性很低,加工成形困难。解决这些问题的有效办法是加入 β 稳定元素,如 Nb、V、Mo 等进行合金化,其中以 Nb 的作用最为

显著。主要是通过降低马氏体转变点 (M_s)，细化 α_2 相，减小滑移长度，另外还能促使形成塑性和强度较好的 $\alpha_2 + \beta$ 的两相组织。典型 Ti₃Al 基合金的力学性能见表 6.23。

表 6.23 典型 Ti₃Al 基合金的力学性能

合金	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	断裂韧性/MPa·m ^{1/2}	高温持久寿命 ^① /h
Ti-Al24-Nb11	761	967	4.8	—	—
Ti-Al24-Nb14	790~831	977	2.1~3.3	16.8	59.5~60
Ti-Al25-Nb10-V3-Mo1	825	1042	2.2	—	—
Ti-Al24.5-Nb17	952	1010	5.8	13.5	>360
Ti-Al24.5-Nb17-Mo1	980	1133	3.4	20.9	475

① 650℃, 380MPa。

注：合金含量为摩尔分数。

TiAl 金属间化合物具有面心四方有序 L₁₀ 超点阵结构。除了与其他高温金属间化合物一样，具有很好的高温强度和抗蠕变性能外，TiAl 具有密度小 ($3.7 \sim 3.9 \text{ g/cm}^3$)、弹性模量高 (160~180GPa) 和抗氧化性能好等特点，是一种很有吸引力的航空与航天用高温结构材料。Ti-Al54 (摩尔分数) 的初-脆转变温度为 700℃ 左右，且随着 Al 含量的减少而降低。TiAl 能在很大的 Al 含量范围内 (Al 的摩尔分数为 49%~66%) 保持相结构的稳定性，可以通过合金化来提高其塑性和强度。

研究表明，通过合金化和微观组织的控制可改善 TiAl 的室温塑性。含有双相 ($\alpha_2 + \gamma$) 层片状组织合金的塑性和强度优于单相 (γ) 组织的合金。对常用的合金元素 V、Cr、Mn、Nb、Ta、W、Mo 等进行试验表明：在 Ti-Al48 (Al 的摩尔分数) 中加入摩尔分数为 1%~3% 的 V、Mn 或 Cr 时，塑性可以得到改善 (伸长率 $\geq 3\%$)。提高合金的纯度也有助于提高其塑性，例如当含氧量 (质量分数) 由 0.08% 降到 0.03% 时，Ti-Al48 合金拉伸时的伸长率由 1.9% 提高到 2.7%。

近年来，人们对钛铝金属间化合物材料特别是 TiAl 的钎焊工艺进行了较多的试验研究，表 6.24 列出了一些有关 TiAl 基合金及其与钢等其他金属材料钎焊的研究结果。一般来说，室温银基钎料钎焊接头的强度优于钛基钎料，而高温下，钛基钎料钎焊接头具有更好的性能。此外，钛基钎料的制备方式对钎焊接头性能有较大的影响，成分相同的 Ti-Cu-Ni 钎料，非晶态箔带形式的钎料钎焊接头的性能优于复合层板形式的钎料。

表 6.24 TiAl 金属间化合物材料钎焊接头的力学性能

母材	钎料	钎焊方法及工艺	测试温度/℃	接头强度/MPa	
				抗拉强度	抗剪强度
TiAl	Ag	真空红外线钎焊, 1100℃×1min	室温	—	385
TiAl	Ag-28Cu	真空红外线钎焊, 950℃×1min	室温	—	343
TiAl	Al-12Si-0.3Cu-0.1Mg-0.2Zn	真空红外线钎焊, 950℃×(2~3min)	室温	—	86.2
TiAl	Ti-15Cu-15Ni	真空钎焊, 1000℃×30min	室温	—	220~230
TiAl	Ti-15Cu-15Ni	真空钎焊, 950℃×15min	室温	295	—
TiAl	Ti-15Cu-15Ni	1000℃×3min	室温	—	398
	Cu-3Si-2.5Ti-2Al	1030℃×1min	室温	—	214
	Ni-20Cr-10Si	—	室温	—	141
TiAl	Ag-34Cu-16Zn	真空钎焊, 900℃×20min	室温	—	190

续表

母材	钎 料	钎焊方法及工艺	测试温度 /℃	接头强度/MPa	
				抗拉强度	抗剪强度
TiAl	Ag-25Cu-4.5Ti	真空钎焊,900℃×20min	室温	—	175
TiAl+AlSi4340	63Ag-35.2Cu-1.8Ti	氮气保护感应钎焊,830℃×30s	室温 500	320 310	—
TiAl+40Cr	70Ag-26Cu-4Ti	真空钎焊	室温	425	—
TiAl+40Cr	63Ag-35.2Cu-1.8Ti	氮气保护感应钎焊,870℃×15min	室温	298	—
TiAl+40Cr	64Ag-34.2Cu-1.5Ti	真空感应钎焊,870℃×5min	室温	267	—
TiAl+40Cr	Ag-34Cu-16Zn	真空钎焊,900℃×20min	室温	—	190
TiAl+40Cr	Ti-32.5Zr-8Cu-6Ni-6Co	真空钎焊,930℃×15min	室温	—	110
TiAl+42CrMo	Ti-20Zr-Cu-Ni	真空钎焊,930℃×60min	室温	167	—
TiAl+42CrMo	Ti-15Cu-15Ni	真空钎焊,1000℃×5min	室温	95.1	—
TiAl+TiB ₂	Ag-27Cu-4.5Ti	真空钎焊,950℃×5min	室温	—	173
Ti ₃ Al	Ti-15Cu-15Ni 非晶态	真空钎焊,982℃×1h	室温	516	—
	Ti-15Cu-15Ni 层板		649	464	
			760	312	
			Ti-20Cu-20Ni 非晶态	室温	518
	649			429	
	760			281	
	Ti-20Cu-20Ni 非晶态		室温	547	—
			649	485	
			760	344	
	Ti-20Cu-25Ni 非晶态		室温	548	—
			649	485	
			760	344	
Ti-20Cu-25Ni 层板	室温		400	—	
	649		488		
	760		302		
Ti ₃ Al	Ti-15Cu-15Ni	真空钎焊,980℃×10min	室温 650	115.6 341.5	—
Ti ₃ Al	Ni-8Cr-5Si-2B-2Fe	真空钎焊, (1050~1100℃)×(250~300s)	室温	—	250~260
Ti ₃ Al	Ti-35Zr-15Ni-21Cu	真空钎焊, (1000~1050℃)×(250~300s)	室温	—	250~260
Ti ₃ Al	Ni-7Cr-5Si-3B-3Fe	真空钎焊,1150℃×5min	室温	—	219.6
	Ti-35Zr-15Ni-15Cu	真空钎焊,1050℃×5min	室温	—	259.6
	Ag-34Cu-16Zn	真空钎焊,900℃×5min	室温	—	125.4
	Cu-7.1P	真空钎焊,900℃×5min	室温	—	98.6
Ti ₃ Al-Nb+TC4	Ti-20Zr-20Ni-10Cu	真空钎焊,960℃×1h	室温	489	—

(6) 钛与铜的电阻钎焊

在电解镍生产中, 大量使用钛板作为阴极板(种板)。钛种板与铜耳的连接最初大多为铆钉连接, 这种连接方式的极板使用寿命短, 使用过程中连接面易受污染和氧化, 导致连接处的导电性不断下降并最终影响电解镍的质量。而采用电阻钎焊技术可实现钛种板与铜耳的可靠连接。电阻钎焊加热迅速, 生产率高, 对周围热影响小, 劳动条件好, 容易实现生产的

自动化。

钎种板材料为 TA2 工业纯钛, 铜耳材料为 T2 紫铜, 采用的钎料为 BA_g50CuZn 箔片, 化学成分及性能见表 6.25。所用钎剂为膏状 QJ102, 使用温度为 600~650℃。

表 6.25 钎料 BA_g50CuZn 的化学成分及性能

化学成分/%			性能			
Ag	Cu	Zn	熔点/℃	抗拉强度/MPa	电阻率/ $10^{-6}\Omega\cdot m$	钎焊温度/℃
50	34	余量	677~775	343	0.076	775~870

钎焊前先将母材加工成 15mm×15mm×3mm 的试样, 采用搭接方式。再将试样在水磨砂纸上打磨, 除去表面层后再在超声波清洗液中清洗 20min 左右后用电吹风快速吹干。试验选用电极为水冷电极, 端面为平面。钎焊过程通氩气保护。焊前将钎剂均匀涂抹于工件连接面, 之后加装钎料。钎焊过程采用二次通电方式进行, 焊接电流、焊接时间和压力对钎焊接头剪切强度的影响如图 6.3 所示。

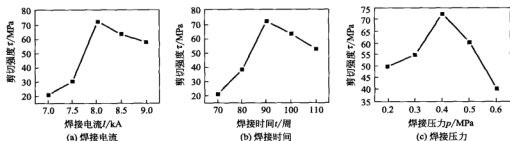


图 6.3 工艺参数对钎焊接头强度的影响

焊后钎缝区主要由中间钎料残余层和钎料近母材的扩散层组成, 钎缝下部和母材 Ti 接触的扩散层界面犬牙交错, 结合紧密连续, 界面组织良好, 无气孔、裂纹、未焊合等缺陷, 钎料和母材合金元素相互扩散良好; 钎缝上部与母材 Cu 接触的扩散层区域界面已完全熔合, 无明显缺陷, 钎料和母材元素相互扩散充分。

6.1.4 镁及镁合金的钎焊

镁合金可以采用火焰钎焊、炉中钎焊及浸渍钎焊等方法, 其中浸渍钎焊应用较为多一些。镁合金钎焊前应清除母材及钎料表面的油脂、铬酸盐及氧化物, 常用的方法主要是溶剂除脂、机械清理和化学浸蚀等。镁合金钎焊时搭接是最基本和最常用的接头形式, 通过增加搭接面积对于接头强度低于母材强度时, 使整体接头与焊件具有相同的承载能力。一般钎焊时在接头处及附近区域添加填充金属, 接头间隙通常取 0.1~0.25mm, 以保证熔融钎料充分渗入到接头间隙中, 形成良好的钎焊接头。

(1) 镁及镁合金的钎焊特点

钎焊作为材料连接方法中的一种, 是一项精密的连接技术, 在许多行业得到广泛的应用。镁及镁合金表面极易氧化, 其钎焊性差, 硬钎焊时必须采用强力钎剂; 软钎焊时, 由于钎焊温度低, 用钎剂去除氧化膜有很大的困难, 有时采用不用钎剂的刮擦软钎焊和超声波软钎焊。近些年, 镁合金的钎焊研究取得了一定的进展, 但仍存在不少问题。

铸造镁合金和变形镁合金的钎焊工艺、钎料和钎剂在 20 世纪 70~80 年代得到发展, 钎焊方法主要有火焰钎焊、炉中钎焊、浸渍钎焊等, 钎料主要使用主组元和母材相同的共晶类

合金。20 世纪 90 年代以后镁合金应用剧增, 镁合金钎焊引起了人们的兴趣, 特别是由于在航天领域作为轻体结构材料的应用。镁合金被认为可能替代部分铝合金、塑料以及钢铁。可钎焊镁合金的成分、物理性质及典型的力学性能见表 6.26 和表 6.27。

表 6.26 几种可钎焊镁合金的成分及物理性能

ASTM 合金牌号	成分(质量分数)/%						密度 /g·cm ⁻³	固相线/℃	液相线/℃	钎焊温度/℃
	Al	Zn	Mn	Zr	RE	Mg				
AZ10A	1.2	0.4	0.20	—	—	余量	1.75	632	643	582~616
AZ31B	3.0	1.0	0.20	—	—	余量	1.77	566	627	582~593
AZ53A	6.0	3.0	0.25	—	—	余量	1.82	455	610	430~450
AZ91C	8.7	0.7	0.20	—	—	余量	1.81	468	598	430~460
K1A	—	—	—	0.70	—	余量	1.74	649	650	582~616
M1A	—	—	1.20	—	—	余量	1.76	648	650	582~616
ZE10A	—	1.2	—	—	0.17	余量	1.76	593	646	582~593
ZK21A	—	2.3	—	0.60	—	余量	1.79	626	642	582~616

注: 1. Mn 含量为最小值。

2. ASTM—美国材料试验学会。

表 6.27 几种可钎焊镁合金的力学性能

合金牌号 (ASTM)	热处理	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
AZ10A	F	145	241	10
AZ31B,C	F	193	262	14
AZ31B	H24	221	290	15
	O	152	255	21
AZ53A	C	145	225	6
AZ91C	C	145	225	6
K1A	F	55	159	14
M1A	F	138	234	9
	H24	186	255	9
	O	110	221	15
ZE10A	H24	179	255	12
	O	138	228	23
ZK21A	F	228	290	10

注: F—制造后状态; H24—加工硬化后进行不完全退火获得相当于 1/2 硬状态的性能; O—回火状态; C—铸件。

钎焊加热可以降低回火态镁合金板的性能, 使之返回到退火-回火状态。例如挤压并回火处理的 AZ31B 镁合金在 595℃×(1~2min) 钎焊后降低了大约 35% 的伸长率、22% 的屈服强度以及 8% 的抗拉强度。

火焰钎焊只是加热钎焊部位可能降低母材局部的性能; 炉中钎焊以及浸渍钎焊降低整体结构的性能。钎焊加热对铸造镁合金或退火的镁合金性能影响不大。

由于镁有很高的化学活性, 镁及镁合金钎焊并非是一个简单的过程。在空气中加热时镁合金母材表面会形成含有氧化镁和氢氧化镁的复杂氧化膜。这层氧化膜化学性质稳定, 在常

规的活性气体气氛以及真空度高达 10^{-3} Pa 环境中不易被去除。通常镁合金的氢氧化物在 300~400℃ 加热时会分解成氢和水,阻碍钎焊过程进行。因此,镁合金钎焊必须用惰性气体或用钎剂保护,以防止在高温停留阶段产生氧化。

镁钎料的密度一般比钎剂的要小,这样钎焊时在接头处会出现熔渣包覆现象。镁合金的电极电位很低 (-2.38V),可以阻碍稳定的电解产物或化学覆盖物的沉积,从而提高熔融钎料的浸润性,也使镁合金免受钎剂腐蚀。

在相关镁合金的加工制造过程中,将会遇到镁合金与钢、镁合金与铝合金等异种材料的连接问题,此类异种材料的钎焊连接有很重要的意义。另外,研究钎焊用低腐蚀钎剂对解决镁合金存在的过烧和腐蚀问题有重要的现实意义。

(2) 镁合金钎料

① 常用镁合金的钎料 镁合金钎焊时所用的钎料一般采用镁基合金钎料,表 6.28 是部分镁合金钎焊时钎料的选用。

表 6.28 部分镁合金钎焊时钎料的选用

合金牌号	主要化学成分/%	熔化温度/℃		钎焊温度/℃	选用钎料	备 注
		固相线	液相线			
AZ10A	Al 1.2, Zn 0.4, Mn 0.2, Mg 余量	632	643	582~616	BMg-1 ^① BMg-2a ^②	炉中钎焊和火焰钎焊只限于 M1 镁合金的焊接,其他合金可用浸渍钎焊
AZ31B	Al 3.0, Zn 1.0, Mn 0.2, Mg 余量	—	627	582~593	BMg-2a	
ZE10A	Zn 1.2, RE 稀土 0.17, Mg 余量	593	646	582~593	BMg-2a	
ZK21A	Zn 2.3, Zr 0.6, Mg 余量	626	642	582~616	BMg-1 BMg-2a	
M1	Mn 1.2, Mg 余量	648	650	582~616	BMg-1 BMg-2a	

① 钎料 BMg-1 化学成分为 9.0%Al, 2.0%Zn, 0.1%Mn, 0.0005%B, 余量 Mg。

② 钎料 BMg-2a 化学成分为 2.0%Al, 5.5%Zn, 0.0005%B, 余量 Mg。

美国焊接学会编写的《钎焊手册》列举的目前可用于镁合金钎焊的商业钎料有: BMg-1、BMg-2a (美国试验材料学会牌号分别是 AZ92A 和 AZ125)。表 6.29 所示为这两种钎料的化学成分和物理性质,其中 MC3 为日本标准的钎料,其成分跟 BMg-1 相近。

表 6.29 低温钎料的化学成分及物理性质

AWS 牌号	化学成分(质量分数)/%							密度 /g·cm ³	固相线 /℃	液相线 /℃	钎焊温度 /℃
	Al	Zn	Mn	Cu	Be	Ni	其他				
BMg-1	8.3~9.7	1.7~2.3	0.15~0.5	0.05	0.0002~ 0.0008	0.005	0.30	1.83	443	599	582~616
BMg-2a	11~13	4.5~5.5	—	—	0.0088	—	0.30	2.10	410	565	570~595
MC3	8.3~9.7	1.6~2.4	<0.1	<0.25	0.0005	<0.01	<0.3	1.83	443	599	605~615

注:余量为 Mg。

表 6.29 中三种钎料都适合于火焰钎焊、炉中钎焊和浸渍钎焊。但这三种钎料熔点较高(604~627℃),配以的钎剂熔点温度也较高(约 538℃),超过大多数镁合金的燃点及熔点温度,因此只适于钎焊 AZ10A、K1A 及 M1A 等少量几种镁合金,并不适于钎焊得到应用的如 Mg-Al-Zn 系等镁合金。中国机械工程学会焊接学会编写的《焊接手册》中有关镁合金的钎焊仅列举了 Mg-Al-Zn 钎料,其成分为 12%Al、0.5%Zn、0.005%Be,其他相关内容极少。在低温下火焰钎焊或浸渍钎焊镁合金,可采用表 6.30 给出的几种低温钎料。

表 6.30 几种低温钎料的成分及物理性质

钎料牌号	成分(质量分数)/%				密度 /g·cm ⁻³	固相线 /℃	液相线 /℃	钎焊温度 /℃
	Al	Zn	Mn	其他				
GA432	2	55	—	—	4.7	330	360	495~505
P430Mg	0.7~1.0	13~15	0.1~0.5	0.3	2.7	380	430	550~560
P380Mg	2.0~2.5	23~25	0.1~0.5	0.3	3.0	340	380	480~500
P435Mg	25~27	1.0~1.5	0.1~0.3	—	2.1	435	520	520~560
P398Mg	21~22	0.2~0.5	0.1~0.3	Cd 25~26	3.7	398	415	430~500

注：余量为 Mg。

在传统钎料的基础上，近几年出现了新的合金系统，有些钎料可以提高钎焊接头力学性能。例如，钎料 Al-25Mg-3.5Cu，固相线温度 448℃，液相线温度 462℃，钎焊接头抗拉强度在室温时达到 122~136MPa，在 260℃时为 93MPa。用 Si 部分取代 Cu，钎料 Al-32Mg-2Cu-1Si 的室温抗拉强度降低到 87MPa。Al 基钎料真空钎焊的热循环要尽量快（485℃×1min），避免界面形成脆硬的金属间化合物层。焊后钎焊接头的沉淀强化为 250℃×24h 热处理。由于钎接头里 Cu 元素的存在，用这种钎料钎焊的结构件应进行防腐保护。

加热温度 437~565℃的 Mg-12Al-2Ca 钎料钎焊镁基复合材料 AZ91/13SiC_p（SiC 颗粒增强），室温抗拉强度可达 180~193MPa，200℃时为 58~70MPa。钎焊接头的金相显示 Mg-Al-Ca 钎料具有良好的流动性，形成了平滑的钎角，跟母材有良好的界面反应，但有非平衡的微观结构，包括固溶晶粒、Mg-Al 共晶以及由 γ -Al₂O₃ 和弥散相（推断是 CaMg₂ 和 Al₄Ca）结晶成的金属间化合物。

低熔点的含钙钎料 Mg-(32~35)Al-2Ca 在 440~448℃温度范围内存在共晶点，在 200℃时的抗拉强度只有 11~14MPa。为了避免冷却后复合结构中存在残余应力，要求钎焊温度尽量低，要在镁合金基体的再结晶温度附近进行钎焊。

一些新型铸造镁合金，如 ZAC8506（Mg-4.7Al-8Zn-0.6Ca），液相线为 600℃，与 BMg-1 钎料相近，但在室温下抗拉强度达 219MPa 和伸长率高达 5%，其蠕变强度比 BMg-1 要高。研究表明，Zn 的少量增加会使钎料的熔点降低 30~40℃，而对强度并无显著的损失。

北京工业大学初步开发了适用于常用变形镁合金 AZ31B 的三种 Mg-Al-Zn 系钎料，其中一种钎料的熔点为 362℃，另两种为 471℃。研究表明，钎料具有良好的浸润性，与母材界面结合良好。工作温度低的镁合金可以用钎料 Zn-3Mg-1Al（熔点 338~400℃）和 Mg-43Zn-9Al（熔点 340~348℃）进行钎焊。以 AZ31 和 AM50 为基体的 Zn-3Mg-1Al 钎料超声波钎焊可以得到抗拉强度分别为 50~68MPa 和 46~82MPa 的钎焊接头。Mg-43Zn-9Al 钎焊接头的强度只有 10~26MPa，但其耐腐蚀性能比 Zn-3Mg-1Al 高。

除此之外，BMg-1 钎料可以通过添加质量分数大约 1% 的 Y 来提高强度。通过添加 Y，Mg-9Al-1Zn 晶粒尺寸降低并形成新相 Al₂Y，其熔点比 Mg₁₇Al₁₂ 高。含 Y 的 Mg-9Al-1Zn 合金固溶处理后的硬度高于不含 Y 的镁合金。由于 Al₂Y 不能溶解于 α -Mg 基体，使得 Mg-9Al-1Zn-1Y 合金 α -Mg 基体的 Al 含量降低，Mg₁₇Al₁₂ 相的时效驱动力下降，时效过程被 Y 延后。

用 Ni、Cu、Ag 的夹层作为钎料，用过渡液相法钎焊镁合金可取得良好效果。540℃时用厚度 0.1mm 的 Ni 夹层做钎料进行钎焊 5min，在接头处形成了多组分的相结构，包含

Mg₂Ni, MgNi₂ 以及 Mg-Mg₂Ni 共晶。Ni 层厚度从 0.1~0.02mm 变化时接头强度提高 3 倍。Mg-Cu 合金系在 510℃ 进行钎焊 3~4s 后出现液相, 15s 后在界面上形成了 Mg₂Cu 金属间化合物夹层。在过渡液相法钎焊 5min 后, 接头组成如下。

- 靠近 Cu 一侧的金属间化合物相 Mg₂Cu。
- 共晶的 Mg-Mg₂Cu。
- 在 Mg 侧的纯镁。

在母材表面真空蒸镀 Ni、Ag 或 Cu 薄膜沉积约 20μm, 可使镁合金钎焊接头得到较好的强度。因此, 过渡液相法钎焊可以有效地用于连接镁合金。

② 镁基复合材料的钎料 镁基复合材料具有高的比强度、比刚度、阻尼性能、耐磨性及耐高温性能, 因而在对轻质高强度材料需求迫切的航空航天、汽车等高新技术领域中具有良好的应用前景。目前已作为人造卫星抛物面天线骨架、支架、轴套、横梁等结构件使用, 在汽车制造业中用作方向盘减震轴、活塞环、支架、变速箱外壳等, 主要由镁合金基体、增强相以及基体与增强相间的接触面组成。

常用的增强相主要有 C 纤维、Ti 纤维、B 纤维、Al₂O₃ 短纤维、SiC 晶须以及 B₄C、SiC、ZrO₂、TiC 和 Al₂O₃ 颗粒等。基体合金主要是镁铝锌合金、镁铝硅合金、镁铝锰合金、镁锂合金及镁铝稀土合金等。其制备方法主要有粉末冶金法、熔体浸渗法、搅拌铸造法、喷射沉积法以及目前仅用于 Mg-Li 基复合材料的薄膜冶金法等。

由于镁基复合材料的特殊构成, 在众多连接技术中, 只有搅拌摩擦焊和钎焊技术可用于其连接。尚未见相关熔化焊焊接镁基复合材料的报道。

由于镁基复合材料再结晶温度较低, 因而在钎焊时要求采用较低的钎焊温度。美国专利中报道了几种钎焊温度在 325~475℃ 的非标钎料: Mg-32Al-2Zn (钎焊温度 > 450℃)、Mg-29Li-2Zn (钎焊温度 > 350℃)、Mg-33Al-33Li (钎焊温度 > 325℃)。钎焊时提供了良好的流动性、润湿性, 获得性能优良的钎焊接头, 钎焊在惰性气体保护下或真空中进行。

SiC、TiC 或 Al₂O₃ 颗粒增强铸造复合材料结构的钎料可以使钎焊接头力学性能有很大的改进。国外正在研制一种采用细陶瓷粉末增强共晶 Mg-36.4Al-6.6Li (共晶温度 > 418℃) 合金作为 SiC、TiC 或 Al₂O₃ 颗粒增强镁基复合材料的钎料, 至少可以提高钎焊接头屈服强度 20% 和蠕变强度 50%~70%。一种采用少量 ZrO₂ 增强的 Mg-8Li-5Al-1Zn 钎料也可获得较高的接头抗拉强度 (> 220MPa)。

复合镁基钎料可以使钎焊接头力学性能有很大的改进, 具有良好的应用前景。

(3) 镁合金钎剂

钎焊镁合金的钎剂主要以氯化物和氟化物为主, 但钎剂中不能含有与镁发生剧烈反应的氧化物, 如硝酸盐等。表 6.31 是镁合金钎焊用钎剂的成分和熔点。

表 6.31 镁合金钎焊用钎剂的成分和熔点

钎焊方法	钎剂成分/%	熔点/℃
火焰钎焊	KCl 45, NaCl 26, LiCl 23, NaF 6	538
火焰、浸渍、炉中钎焊	KCl 42.5, NaCl 10, LiCl 37, NaF 10, AlF ₃ · 3NaF 0.5	388

镁合金钎焊的钎剂主要以碱金属和碱-稀土金属卤盐 (如氯化物、氟化物等) 为基础, 用 LiCl、NaF 作为活性成分, 以粉末形式为主, 偶有用酒精调配成钎剂膏使用。美国焊接协会的 FB2-A 型钎剂可用于镁合金钎焊。但由于钎剂本身的腐蚀性, 钎焊接头焊后需彻底地去除钎剂残留。表 6.32 是几种常用的镁钎剂。

表 6.32 几种常用的钎剂

钎剂牌号	钎剂成分(质量分数)/%											熔点 /℃	钎焊温度/℃
	KCl	LiCl	NaCl	NaF	LiF	CaLi ₂	CdCl ₂	ZnCl ₂	冰晶石	光卤石	ZnO		
F380Mg	余量	37	10	10	—	—	—	—	0.5	—	—	380	380~600
F530Mg	余量	23	21	3.5	10	—	—	—	—	—	—	530	540~600
F540Mg	余量	23	26	6	—	—	—	—	—	—	—	540	540~650
F390Mg	余量	30	—	—	—	—	15	10	—	—	—	390	420~600
F535Mg	余量	—	12	4	—	30	—	—	—	—	—	535	540~650
F400Mg	—	—	—	—	—	—	—	—	8	89	3	400	415~620
F450Mg	—	—	15	—	—	余量	—	—	—	—	—	450	450~650

活性接触钎剂也可用于镁合金钎焊,它能沉淀 Zn 薄膜,熔融钎料,促进镁表面的润湿。在火焰钎焊前钎剂必须完全干燥,有时需要额外的加热和研磨,避免氢氧化镁的形成,完成高质量的钎焊。镁合金钎焊的钎剂一般是干粉(炉中钎焊)或用酒精做胶合剂的软膏(火焰钎焊)。

干的粉状钎剂撒布在接头上可以得到比较好的钎焊效果。钎剂不能掺水,掺水会妨碍钎料的流布。钎剂软膏要在干燥恒温箱或有流通空气的炉子里加热到 177~204℃,保温 5~15min。由于会留下很多的烟灰附着物,钎剂不能用火焰干燥。

清华大学单际国等研制了由分析纯 CsF、AlF₃ 和 ZnF₂ 研磨制备的钎剂,适合于低于 500℃ 的中温钎焊 Al-Mg 合金。这一思路值得注意,因为 ZnF₂ 使 MgO 薄膜疏松,从而促使熔化的钎料在合金表面润湿铺展并填充焊缝间隙。

炉中钎焊应控制钎焊时间,保证基体金属的过烧能减至最低程度,并防止镁燃烧。钎焊时间应是使钎料完全流布所需的最短时间,以防钎料过分扩散和镁燃烧,通常在钎焊温度下保温 1~2min 即可完成钎焊过程。有时随工件厚度及定位夹具的不同,可适当延长或缩短保温时间。钎焊后应将零件在空气中自然冷却,不要强迫通风,以免钎焊件变形。

浸渍钎焊由于钎剂熔池体积大,加热比较均匀,所以浸渍钎焊质量优于其他钎焊方法,应用较多。镁合金的浸渍钎焊起着加热和钎剂化双重作用,接头间隙为 0.10~0.25mm,钎料预先放置好,用不锈钢夹具组装好部件。在炉中预热 450~480℃,以驱除湿气并防止热冲击。在钎剂浴中零件加热很快,厚度 1.6mm 的基体金属浸渍时间为 30~45s,重量较大并带有夹具的大型组合件,浸渍时间需 1~3min。

6.2 钢铁材料的钎焊

6.2.1 碳钢和低合金钢的钎焊

碳钢以铁为基体,以碳为主要合金元素,碳含量一般不超过 1.0%。此外,锰含量低于 1.2%、Si 含量不超过 0.5% 者皆不作合金元素。碳钢的性能主要取决于含碳量。低合金钢是在碳钢的基础上,添加一定的合金元素所形成的钢种,但合金元素的总含量不超过 5%。

(1) 钎焊特点

碳钢钎焊时在表面往往会形成四种类型的氧化物: α -Fe₂O₃、 γ -Fe₂O₃、Fe₃O₄(FeO·Fe₂O₃) 和 FeO。除 Fe₃O₄ 外,其他氧化物都是多孔状和不稳定的,而且所有氧化物都容易被钎剂去除,也容易被还原性气体还原。所以,碳钢,特别是低碳钢具有很好的钎焊性。

对于低合金钢,如合金元素含量较低,则金属表面基体上为铁的氧化物。但随着合金元素含量的提高,则还可能生成其他的氧化物,这在选择钎剂时必须加以考虑。在低合金钢表面生成的氧化物中,影响最大的是铬和铝的氧化物,它们的稳定性较大,使钎焊过程较难进行,为了去除这些氧化物,就需要使用活性较大的钎剂或采用露点较低的保护气氛。

此外,合金钢常在淬火和回火的状态下使用,所以还需考虑钎焊时可能发生的退火软化等问题。

(2) 钎料和钎剂

碳钢钎焊软钎料包括锡铅钎料、镉锌基钎料等。其中,锡铅钎料的熔点最低,对母材性能不产生有害影响,应用最多。但锡铅钎料与钢能形成 FeSn 金属间化合物,所以要适当控制钎焊温度和保温时间。

碳钢及低合金钢硬钎焊时,主要采用铜基钎料和银基钎料。纯铜由于熔点高,主要用于保护气体钎焊和真空钎焊,也可在碳钢和低合金钢表面电镀铜层作为钎料,其钎焊温度约为 1130°C 。钎焊时,铁有溶于铜中的倾向。而铜又能向铁的晶间渗入,由于钎料和母材的合金化,钎缝强度大大提高。例如铸造状态铜的强度为 $186\sim 196\text{MPa}$,而在保护气体中用铜钎焊的低碳钢接头的强度达到 $294\sim 343\text{MPa}$ 。用铜基钎料钎焊钢时,接头间隙应小于 0.05mm ,否则钎料难以填满全部间隙。使用黄铜钎料时,为了防止锌的蒸发,必须采用快速加热方法,如火焰钎焊、感应钎焊、浸渍钎焊等;通常选用含有少量硅的钎料,可有效地减小锌的蒸发。黄铜钎料的钎焊温度比较低,钢不会发生晶粒长大,钎焊接头的强度和塑性均比较好。例如,用 BCu62Zn 钎料钎焊的低碳钢接头强度达 421MPa ,抗剪强度达 294MPa 。

银基钎料主要采用 BAg45CuZn 、 BAg40CuZnCd 、 BAg50CuZnCd 和 BAg40CuZn 等。银基钎料的工艺性能好,钎焊温度比铜基钎料低,在钢表面具有良好的铺展性,钎焊接头的强度和塑性都是比较好的。例如,用 B-Ag50CuZnCd 钎料钎焊的低碳钢接头强度可达 294MPa 。因此,银基钎料都用来钎焊重要的结构。钎焊淬火的合金钢时,为了保证接头力学性能,防止钎焊过程中发生退火,钎焊温度应限制在高温回火温度以下。如钎焊 30CrMnSiA 时,使用熔点较低的 BAg50CuZnCd 钎料,它可以保证得到高质量的接头,使接头的抗剪强度达 $349\sim 431\text{MPa}$,抗拉强度达 $476\sim 651\text{MPa}$ 。

钎焊碳钢或低合金钢一般均需要用钎剂或适当的保护气体。钎剂常按所选择的钎料而定。软钎焊时,与钎料匹配的钎剂主要为松香或氯化锌、氯化铵的混合物。硬钎焊时,钎剂常由硼砂、硼酸和某些氟化物等组成。如黄铜钎料则选硼砂或硼砂与硼酸的混合物作钎剂;银基钎料可选择硼砂、硼酸和某些氟化物的混合物作钎剂。钎剂和保护气氛可同时使用。钎剂可采用膏状、粉状和与钎料相结合等形式。在手工送钎料时,手持钎料丝,随时黏着适量的钎剂以备使用。在保护气氛中钎焊时,钎料需预先放置在接头内或安放在接头附近,然后把组件装入钎焊工作室中去,必须控制钎焊的最高温度和保温时间,以保证适当地熔化,使钎料完全渗入接头。

(3) 钎焊工艺

① 接头间隙设计 钎焊接头应该紧密配合,设计要合理。当使用有机钎剂时,对于大多数钎料,接头间隙 $0.05\sim 0.13\text{mm}$ 可以得到较好的力学性能。炉中钎焊使用 BCu 钎料时推荐使用轻压配合。 BNi 钎料和 BAg 钎料的接头间隙应控制在 $0\sim 0.13\text{mm}$ 的范围内,具体值取决于合金的类型。

紧装配的接头需采用具有相对窄熔点范围的钎料,相反,具有宽熔点范围的钎料在应用于松的配合间隙时,具有良好的跨越特性,钎料不易流失。炉中钎焊保护气体的露点能够用来控制钎焊大间隙缝隙时 BCu 钎料的流动性。同时炉中钎焊的工艺参数,如加热温度、保

温时间和加热速度等,也能用于控制 BCu、BNi 和 BA_g 钎料的流动性。

② 钎焊方法 碳钢和低合金钢钎焊可采用大多数加热方法,最常用的是火焰加热、炉中加热和感应加热。能够使用电动送丝机以自动提供连续丝和带的方式送钎料,通过压缩分配设备自动提供钎剂和膏状粉末钎料。手工钎焊设备包括氧-乙炔或丙烷焊炬及装置。使用或不使用控制气氛的箱式或连续炉中钎焊也能被使用,它们可以是电加热、燃气加热、燃油加热的,并且配备精密的温度控制装置。

③ 预清洗 要获得理想的钎焊接头质量,在钎焊之前要对部件进行彻底清洗。把有机和无机污染物从将要钎焊的位置上或接头处清洗掉。如果采用炉中钎焊,整个部件必须彻底清洗。

清洗工艺取决于部件上污染物的类型和程度,可以采用机械、化学、电化学等方法,或者将上述三种方法结合起来使用。但应注意钎剂对于表面污染物的清理能力是有限的,不论钎剂,还是炉中的控制气氛都不能作为焊前清洗剂来使用。清洗后可以通过溶剂擦拭试验确定增加清洗的必要性;或者进行水膜破裂试验确定表面是否清洗彻底,由于水在设有有机物污染的表面会形成一个连续的薄膜,如果残留有机物,则在表面会形成水珠。

④ 钎焊工艺要点 在火焰钎焊中,通常采用中性焰或微还原的火焰,从工件表面将钎料送到顶涂钎剂的接口上,也可以使用预涂钎剂的钎料。对于所有的钎焊方法,在钎焊过程中工件不要过热,以防止母材、钎料或钎剂产生不良的冶金产物,尤其是钎料中如含有可挥发元素,例如锌和镉,更要特别注意钎焊温度下不能停留太长时间。

在生产应用中,钎料(通常是 BCu 和 BNi)在组装部件被移到控制气氛的箱式炉、连续炉钎焊之前,先预置在接头上或靠近接头的位置上,用于钎焊的感应加热器通过选择设计的线圈和感应加热回路中的电流频率,在钎焊面上控制最高温度。

对于调质钢的钎焊,为了保持较高的力学性能,通常选择淬火温度或低于回火温度进行钎焊。但在淬火温度下钎焊时,由于钢和有色金属的钎料膨胀系数不同,刚性大的接头在钎焊后的淬火中容易引起焊缝的局部破坏。这类钢的淬火温度不高,回火温度低,通常选用熔点较低的银基钎料在 650~700℃ 下进行钎焊。为了减少焊件的退火软化,采用快速加热的感应钎焊、盐浴浸渍钎焊。

在保护气氛中钎焊低碳钢时,由于氧化铁容易还原,对气体的纯度要求不高。钎焊低合金钢如 30CrMnSiA 时,因金属表面尚有其他氧化物存在,对气体纯度要求高些。但是在低于 650℃ 温度下钎焊时,即使纯度很高的气体,也不能使钎料铺展,必须配合使用气体钎剂,如 BCl₃、PCl₃ 等,才能保证 BA_g40CuZnCd 钎料在低合金钢表面上铺展。

⑤ 钎焊后处理 基体金属适合于淬火处理,则可趁焊件还处于高热状态时淬入水中进行处理。当采用钎剂进行钎焊时,因为钎剂的残渣多数都对母材有不良影响,必须彻底清除。但对于易产生裂纹或引起变形的焊件,此法应慎重考虑。

残渣还可以采取机械方法清除,如用金属丝刷或在水中冲洗或刷洗。有条件的情况下,可进行喷砂处理。对有机钎剂的残渣可用汽油、酒精、丙酮等有机溶剂擦拭或清洗;氯化锌和氯化铵等的残渣腐蚀性很强,应在体积分数为 10% 的 NaOH 的水溶液中清洗中和,然后用热水和冷水洗净;硼酸和硼酸盐钎剂的残渣呈玻璃状黏附在接头表面,不易清除。一般只能用机械方法或在沸水中长时间浸煮来解决。钎焊后清除的对象有时还有阻流剂。对于只与母材机械黏附的阻流剂物质,可用空气吹、水冲洗或金属丝刷等机械方法清除。若阻流剂物质与母材表面存在相互作用时,用热硝酸+氢氟酸清洗,可取得良好效果。

6.2.2 不锈钢的钎焊

(1) 不锈钢的分类

常见的不锈钢可分为四大类：奥氏体不锈钢、铁素体不锈钢、马氏体不锈钢、沉淀硬化不锈钢。

① 奥氏体不锈钢 这类钢都是铁、铬和镍（或锰）的合金。加入镍和锰可以使钢中的高温相奥氏体稳定到室温，并使这些合金成为非磁性和不能淬硬的合金。这类钢强度不很高，但具有很高的耐热性和耐腐蚀性。典型的牌号有 1Cr18Ni9、1Cr18Ni9Ti、1Cr18Ni9Nb，其中后两种是稳定型不锈钢。

② 铁素体不锈钢 这类钢基本上是铁、铬低碳合金。在其中加入了足够量的铬，使钢中低温相铁素体稳定在一个较宽的温度范围内。典型的牌号有 0Cr13、Cr17 等，其中 Cr17 是一种广泛应用的品种。

③ 马氏体不锈钢 这是一些铁-碳-铬的合金。典型的牌号有 2Cr13、1Cr12Ni2W2MoV 等，另外还有 1Cr13、Cr17Ni2 等。后者除具有马氏体组织外，尚含有一定量的铁素体，但性能基本上是属于马氏体不锈钢。属于高铬高碳型的有 9Cr17MoVCo、9Cr18MoV 等。马氏体不锈钢与铁素体不锈钢接近，但它们能够进行热处理强化，经淬火及回火后具有良好的强度、塑性、韧性、耐蚀性等综合性能。

④ 沉淀硬化不锈钢 这类钢应用于具有高强度、耐热和耐腐蚀性能的场合。在这些合金中，加入了铝、钛、铜和钼等合金元素，可通过特殊的热处理而使这些合金沉淀硬化。添加合金元素制成的这类不锈钢基本上都是铬-镍奥氏体不锈钢。然而，这类合金并不完全都是奥氏体组织，有时还会形成一些马氏体组织。

不锈钢钎焊广泛用于航空航天、核能装置、电子通信、仪器仪表等工业领域，如管子和接头、蜂窝结构、火箭发动机推力室、微波波导组件、热交换器及各种工具等。此外，在日常生活中遇到的诸如采用不锈钢加工的锅、杯等容器、器皿也可用钎焊方法生产。

（2）钎焊特点

① 表面氧化膜 不锈钢除含铁外，还有铬、镍、锰、钛、钼、钨、钒等元素，所以不锈钢表面上能形成多种氧化物，甚至是复合氧化物。其中 Cr_2O_3 是比较稳定的氧化物，较难去除，必须采用活性强的钎剂；在保护气氛中钎焊时，只有在低露点（ -52°C ）的氢气保护下，加热到 1000°C 以上才能将其还原。不锈钢中含有钛元素时，氧化物更稳定，更难去除。

② 钎焊热循环的影响 对非热处理强化的不锈钢，选择的钎焊温度应使晶粒不致严重长大。例如，1Cr18Ni9Ti 不锈钢的晶粒长大温度为 1150°C ，因此应低于此温度钎焊。奥氏体不锈钢在钎焊加热到 $427\sim 876^\circ\text{C}$ 范围时，由于碳化物的析出容易引起晶间腐蚀，为此应尽量避免在该温度范围内钎焊。必须要求在此温度区间进行钎焊时，应尽可能缩短加热时间。

对于马氏体不锈钢，只有经过适当的淬火和回火才能获得优良的性能，所以钎焊温度的选择更为严格。这类钢的钎焊温度，或选择与其淬火温度相适应，使钎焊过程和淬火加热结合起来；或者选择不高于它们的回火温度。通常选择的钎焊温度为 1000°C 左右，对于 Cr17Ni2 和 1Cr12Ni2W2MoV 不锈钢也可以选择低于 650°C 钎焊。

沉淀硬化不锈钢的钎焊与马氏体不锈钢的钎焊相似，钎焊这类钢所用钎焊热循环也必须与它们的热处理相匹配。

③ 其他问题 用黄铜钎料钎焊奥氏体不锈钢时会发生自裂现象；用镍基钎料钎焊时，接头间隙大小对接头性能有重要影响。

（3）钎料、钎剂和保护气体

根据不锈钢焊件的用途、钎焊温度、接头性能及焊接成本的不同，可用于不锈钢的硬钎

料有银基钎料、铜基钎料、锰基钎料、镍基钎料及贵金属钎料等。

① 银基钎料 银基钎料是钎焊不锈钢最常用的钎料，银铜锌及银铜锌镉钎料应用最广。银铜锌及银铜锌镉由于钎焊温度不太高，因而对母材的性能影响不大。这些钎料在钎焊温度下容易引起晶界析出碳化物，但由于 1Cr18Ni9Ti、1Cr18Ni9Nb 不锈钢含有钛、铌稳定剂，则可避免出现晶间腐蚀。银基钎料钎焊 1Cr18Ni9Ti 的接头强度见表 6.33。

表 6.33 银基钎料钎焊 1Cr18Ni9Ti 的接头强度

钎料	钎料强度/MPa	接头抗拉强度/MPa	接头抗剪强度/MPa
BCu53ZnAg	451	386	198
BCu40ZnAg	353	343	190
BAG45CuZn	386	394	198
BAG50CuZn	343	375	201
BAG40CdZnCu	392	375	205

钎焊不含镍的不锈钢时，接头在潮湿空气中会发生缝隙腐蚀。为了防止这种现象，应采用含镍较多的钎料，如 BAG50CuZnCdNi。这时钎缝与母材间形成明显的过渡层，钎缝和钢之间结合良好，电极电位过渡比较平缓，因而提高了抗腐蚀性能。

钎焊马氏体不锈钢时，为了保证母材不发生退火软化现象，须在不低于 650℃ 下进行钎焊，此时可选用 BAG40CuZnCd 钎料。银铜锌钎料的高温性能较差，一般用来钎焊工作温度在 300℃ 以下的焊件；银铜锌镉钎料的高温性能比银铜锌钎料还要差些。

在保护气氛中钎焊不锈钢时，可以采用含锂的自钎剂钎料，如 BAG92Cu (Li)、BAG72Cu (Li) 和 BAG62CuNi (Li) 等。真空钎焊不锈钢时，要求钎料不含易蒸发的锌、镉等元素。但银铜共晶钎料 (BAG72Cu) 的润湿性不好，这时可选用含锰、镍、钨等元素的银基钎料。

银基钎料钎焊的不锈钢接头，其使用温度一般不宜超过 300℃，因为超过 300℃ 以后，钎焊接头强度急剧下降。若要求提高工作温度，可选用 BAG49CuZnMnNi 钎料，但此钎料在高于 480℃ 后抗氧化性能急剧下降。银基钎料常以棒状、丝状、片状及箔状供货选用。

② 铜基钎料 用于不锈钢钎焊的铜基钎料主要有纯铜、铜镍及铜锰钴钎料等。纯铜钎料主要用于气体保护下钎焊 1Cr18Ni9Ti 不锈钢。当用于真空钎焊时，钎焊时间要短，或充以部分氩气，以防止铜的蒸发。另外，纯铜钎料用于保护气氛或真空钎焊的抗氧化性不好，所以钎焊接头的工作温度不宜超过 400℃。

用黄铜钎料（如 BCu62Zn）钎焊不锈钢时，容易使不锈钢产生自裂现象，建议少用。铜磷钎料与不锈钢能产生脆性界面层，所以不适用于不锈钢的钎焊。对于在较高温度下工作的焊件，可以用高温铜基钎料，如铜镍钎料（如 BCu68NiSi）主要用于火焰钎焊、感应钎焊等方法。炉中钎焊时，由于钎焊温度高（约 1200℃），会使不锈钢晶粒明显长大，如晶粒由钎焊前的 7~8 级变成钎焊后的 3~4 级，为了避免近缝区晶粒的过度长大，最好不进行重复补焊。采用高温铜基钎料钎焊 1Cr18Ni9Ti 搭接待头的强度见表 6.34。

表 6.34 高温铜基钎料钎焊 1Cr18Ni9Ti 搭接待头的强度

钎料型号	接头抗剪强度/MPa			
	20℃	400℃	500℃	600℃
BCu68NiSi	324.3~339	186~216	—	154~182
BCu69NiMnCoSi(B)	241~298	—	139~153	139~152

采用两种钎料获得的不锈钢接头强度相当，但用 BCu69NiMnCoSi 钎料的钎焊温度比

BCu68NiSi 钎料低 80℃ 左右, 不会使不锈钢发生晶粒长大现象。同时钎料向母材的晶间渗入层厚度小, 最大为 0.03mm, 而 BCu68NiSi 钎料钎焊向母材的渗入最大可达 0.17mm, 因此, 可用 BCu69NiMnCoSi 钎料代替 BCu68NiSi 钎料钎焊不锈钢导管。

铜锰钴钎料主要用于保护气氛中钎焊马氏体不锈钢。采用 BCu58MnCo 钎料钎焊马氏体不锈钢, 控制钎焊温度 996℃, 恰可以与大多数马氏体不锈钢的淬火温度相适应, 用这种钎料钎焊的 1Cr13 不锈钢的抗剪强度见表 6.35。

表 6.35 1Cr13 不锈钢钎焊接头抗剪强度

钎料型号	接头抗剪强度/MPa			
	20℃	427℃	538℃	649℃
BCu58MnCo	415	317	221	104
BAG82Ni	441	276	217	149
BAG76CuPd	299	207	141	100

在 538℃ 温度下, 用 BCu58MnCo 钎料钎焊的 1Cr13 不锈钢接头的强度与用 BAu82Ni 钎料钎焊的接头强度相近, 比用 BAG76CuPb 钎料钎焊的接头强度高。由钎焊接头在静止空气中的抗氧化试验结果表明: BCu58MnCo 钎料可以工作到 538℃; BAu82Ni 钎料的工作温度达 649℃; 而 BAG76CuPb 钎料的最高工作温度必须限制在 427℃。

疲劳试验结果表明: BCu58MnCo、BAu82Ni、BAG76CuPb 钎料的疲劳强度(持久时间 10 周)分别为 172MPa、206MPa、172MPa。因此, BCu58MnCo 钎料钎焊马氏体不锈钢, 有可能代替 BAu82Ni 钎料钎焊压气机不锈钢静子等在 538℃ 以下工作的重要部件, 使生产成本大大下降, BCu58MnCo 钎料主要用于气体保护炉中钎焊(因含锰量高)。因此, 在 1000℃ 钎焊温度下要求保护气体的露点要低于 -52℃, 钎料对于母材的熔蚀小, 可用来钎焊薄件。铜基钎料通常制成棒状、丝状及片状供货。

③ 锰基钎料 主要用于气体保护钎焊, 要求气体的纯度较高。它们不适于火焰钎焊和真空钎焊。由于锰基钎料的熔点较高, 为了避免母材的晶粒长大, 应尽量选择钎焊温度低于 1150℃ 的相应钎料。用锰基钎料钎焊不锈钢可以获得满意的钎焊效果, 表 6.36 列出了锰基钎料钎焊 1Cr18Ni9Ti 不锈钢接头的强度。

表 6.36 锰基钎料钎焊 1Cr18Ni9Ti 不锈钢接头的强度

钎料型号	接头抗剪强度/MPa					
	20℃	300℃	500℃	600℃	700℃	800℃
BMn70NiCr	323	—	—	152	—	86
BMn40NiCrCoFe	248	255	216	—	157	108
BMn68NiCo	325	—	253	160	—	103
BMn50NiCuCrCo	353	294	225	137	—	69
BMn52NiCuCr	366	270	—	127	—	67

Mn-Ni-Co-B 钎料中因含硼而降低了钎料熔点且改善了钎料的铺展性。钎焊温度在 1060℃ 左右, 排除了晶粒长大的可能性。用这种钎料钎焊 1Cr18Ni9Ti 不锈钢管接头的抗拉强度与 BCu68NiSi 钎料钎焊的相近, 但晶间渗入深度小。

④ 镍基钎料 镍基钎料钎焊不锈钢, 可以得到较好的高温性能, 但用镍基钎料钎焊时, 装配间隙的大小对接头的强度及塑性有很大的影响, 间隙小则性能好。以镍基钎料 BNi74CrSiBFe、BNi82CrSiBFe、BNi71CrSi 钎焊 1Cr13 和 1Cr18Ni11Nb 不锈钢为例, 当接头间隙极小时, 以这三种钎料钎焊的接头的抗拉强度基本相同, 并与母材等强度, 塑性也较

好。当间隙增大至 0.05mm 时,接头的强度和塑性急剧下降,间隙达 0.1mm 时,接头的塑性已趋于零。这主要是由于镍基钎料常含有较多的硼、硅或碳,使钎料由很多非金属脆性化合物组成。

钎焊过程中,钎料中的硼、硅、碳等元素向不锈钢扩散形成复杂的带有脆性的化合物,当间隙极小时,钎缝中这些元素的含量少,扩散距离又短,因此在钎焊时间内得以全部扩散,使钎缝组织变为铬在镍中的固溶体;间隙大时,钎缝中的硼、硅或碳量增多,扩散距离也增大,这些元素来不及向母材全部扩散,因此钎缝中间留下连续的脆性层,接头的强度和塑性急剧下降。

由于碳和硼的原子直径小,并且容易全部扩散掉;硅的原子直径大,主要向晶内扩散,扩散速度慢,所以用含硅量高的 BNi71CrSi 钎料钎焊的不锈钢更容易出现连续的脆性相层,以致 BNi71CrSi 钎料对间隙的影响更为明显。BNi82CrSiBFe 镍基高温钎料,在真空或氩气保护下,对不锈钢有良好的润湿性和填充间隙的能力。用此钎料钎焊的接头可获得较高的强度,具有耐高温、耐低温及高真空气密性等特点。此钎料可制成直径为 0.154~0.05mm (100~300 目)的粉末和厚度为 0.03~0.05mm 的箔带供应。

用 BNi77CrP 钎料钎焊不锈钢时,由于磷向母材扩散速度很慢,而且在不锈钢中的溶解度很小,要求不出现脆性化合物相的钎缝最大间隙是很小的,在正常钎焊范围内不大于 10 μ m。因此,用此钎料钎焊时装配间隙要小。

⑤ 贵金属钎料 在金银钎料中,典型的是 BAu82Ni。在银铜钎料中,以 BAu54CuPd 钎料钎焊的接头性能最好,应用较广。

采用 BAu82Ni 钎料钎焊 1Cr18Ni11Nb 不锈钢,严格控制钎焊温度,不会发生晶粒长大现象;钎焊马氏体不锈钢,可使淬火和钎焊过程结合起来,同时此钎料对间隙大小不敏感。它钎焊 1Cr18Ni11Nb 不锈钢,接头间隙不超过 0.15mm,接头强度基本不变,接头抗拉强度基本上与母材相等,接头的抗氧化能力在 817℃ 以下都很好。另外,钎料没有向不锈钢晶间渗入的现象,对母材的熔蚀也不大,可以钎焊薄件。但它的价格昂贵,现已被其他钎料(如 BAu54CuPd、BCu58MnCo 等钎料)逐步取代。

⑥ 钎剂和保护气体 使用钎剂钎焊不锈钢时,为了除去焊件表面的氧化铬,必须采用活性强的钎剂。用铜基钎料钎焊不锈钢时,可采用 YJ-6 钎剂;银铜钎料钎焊不锈钢时可采用 QJ101 和 QJ102,其中 QJ102 钎剂的效果较好。使用银铜钎料钎焊时,以用 QJ103 钎剂为宜。

许多不锈钢组件可在干燥的氢、氩、氮和离解氨的气氛中,在不添加钎剂的情况下进行炉中钎焊。但有些构件在钎焊中还必须使用钎剂,由于不锈钢表面含有像氧化铬等比较稳定的氧化膜,它在钎焊时的清除比碳钢更困难。因此,要求保护气体具有一 40℃ 或更低的露点,即必须采用高纯度的保护气体,否则,应采用高活性的专用钎剂。使用离解氨气氛时必须注意,有些不锈钢在钎焊温度下可能发生偶然的渗氮现象,使表面硬化。表面硬化可能是有益的,也可能是有害的,这取决于焊件的使用要求。

在保护气体炉中钎焊接头,在正常的钎焊温度下,不能使氧化铝和氧化钛还原。如果这些元素含量很少,则采用高纯度的保护气体和汽化钎剂可以获得良好的接头。如果这些元素的质量分数超过 1% 或 2%,可通过表面镀镍来代替钎料进行钎焊。电解镍镀层厚度应保持在 5~50 μ m 范围内。镀镍层过厚,会降低接头的强度,还可能在镀层上发生断裂。

(4) 钎焊工艺

① 钎焊前清理和表面准备 不锈钢钎焊前的清理要求比碳钢更为严格。这是因为不锈钢表面的氧化物在钎焊时更难以用钎剂或还原性气氛加以清除。

不锈钢钎焊前的清理应包括清除任何油脂和油膜的脱脂工作。待焊接头的表面还要进行机械清理、化学清理(表 6.37)或电化学清理(表 6.38)。采用烙铁钎焊时,一般采用机械方法清理;真空钎焊和气体保护钎焊常采用化学方法或电化学法进行清理。

表 6.37 不锈钢钎焊前化学清理方法

母材	侵蚀液成分(质量分数)/%	处理温度/℃	时间	用途
不锈钢	H ₂ SO ₄ 16, HNO ₃ 15, H ₂ O 余量	100	30s	适于批量生产
	HCl 25, HF 30, H ₂ O 余量	50~60	1min	
	H ₂ SO ₄ 10, HCl 10, H ₂ O 余量	50~60	1min	

表 6.38 不锈钢钎焊前电化学清理方法

母材	侵蚀液成分(质量分数)/%	时间/min	电流密度/(A·cm ⁻²)	电压/V	温度/℃	用途
不锈钢	正磷酸 65	15~30	0.06~0.07	4~6	室温	适于大批量生产
	硫酸 15					
	铬酐 5					
	甘油 12					
	H ₂ O 3					

不锈钢表面要避免用金属丝刷子擦刷,尤其要避免使用碳钢丝刷子擦刷。清理以后要防止灰尘、油脂或指痕重新沾污已清理过的表面。最好的办法是:零件一经清洗之后立即进行钎焊,否则,就应把清洗过的零件装入密封的塑料袋中,一直封存到钎焊前为止。

② 钎焊方法 不锈钢可以用多种钎焊方法进行钎焊,如常见的烙铁、火焰、感应、炉中等钎焊方法。炉中钎焊用的设备必须具有良好的温度控制(钎焊温度的偏差要求±6℃)系统,并能快速冷却。

硬钎焊时,广泛采用的钎焊方法是保护气体钎焊。用氮气作保护气体时,对气氛的要求视钎焊温度和母材成分而定:对于 1Cr13 和 Cr17Ni2 等马氏体不锈钢在 1000℃ 温度下钎焊时,要求气氛的露点低于-40℃;对于不含稳定剂的 18-8 型铬镍不锈钢,在 1150℃ 钎焊时,要求气氛的露点低于-25℃;但对含钛稳定剂的 1Cr18Ni9Ti, 1150℃ 钎焊时的氢气露点必须低于-40℃。钎焊温度越低,要求的氢气露点越低。

采用氮气保护钎焊时,由于氮气无还原作用,因此要求氮气纯度较高。采用氮气保护高频钎焊,可以取得良好的效果。氮气保护钎焊时,为了保证去除不锈钢表面的氧化膜,可以采用气体钎剂,常用的有加 BF₃ 气体的氮气保护钎焊。采用含铈或硼等自钎剂钎料时,即使不锈钢表面有轻微的氧化,也能保证钎料铺展,从而提高钎焊质量。

真空钎焊不锈钢时,真空度要视钎焊温度而定。表 6.39 列出不同温度下获得的 18-8 型不锈钢真空钎焊接头外观检查结果。可以看出,随着钎焊温度的升高,真空度要求可降低。

表 6.39 18-8 型不锈钢真空钎焊接头外观检查结果

钎焊温度/℃	真空度/Pa	润湿性	外表	钎焊温度/℃	真空度/Pa	润湿性	外表
1150	1.33×10^{-2}	很好	光亮	900	1.33×10^{-2}	尚好	光亮
1150	1.33	好	淡绿	900	1.33×10^{-1}	无	—
1150	133	无	厚氧化膜	850	1.33×10^{-2}	差	淡黄

用镍基钎料钎焊不锈钢时,常出现脆性化合物,使接头性能变坏。因此,要求有较小的装配间隙,一般均在 0.04mm 以下,有的甚至为零间隙,这就为零件的装配和制造带来困

难。若提高钎焊温度或延长钎焊保温时间,则可适当增加装配间隙。

③ 钎焊后处理 不锈钢钎焊后的主要工序是清理残余钎剂、残余阻流剂和进行热处理。非硬化不锈钢零件在还原性或惰性气氛炉中进行钎焊时,如果没有使用钎剂和没有必要清除阻流剂时,则不必清理表面。

根据所采用的钎剂和钎焊方法,残余钎剂的清除可以用水冲洗、机械清理或化学清理。如果采用研磨剂来清洗钎剂或钎焊接头附近中热区域的氧化膜时,应使用砂子或其他非金属细颗粒。不能使用不锈钢以外的其他金属细粒,以免引起锈斑或点状腐蚀。马氏体不锈钢和沉淀硬化不锈钢制造的零件,钎焊后需要按材料的特殊要求进行热处理。

用镍铬硼和镍铬硅钎料钎焊不锈钢时,钎焊后扩散处理常常是不可缺少的工序。扩散处理不但能增大最大钎缝间隙,而且能改善钎焊接头组织。如用 BNi82CrSiBFe 钎料钎焊不锈钢接头经 1000℃ 扩散处理后,钎缝虽仍有脆性相存在,但只有硼化铬相,其他脆性相均已消失,而且硼化铬相呈断续状分布,这有利于改善接头的塑性。

6.2.3 铸铁的钎焊

铸铁的性能取决于化学成分和显微组织。工业中常用的铸铁含有大于 2% C、1%~3% Si 和少量 Al,还含有少量 Mn 及 S、P 等杂质。为了获得某种特殊性能,可添加一定量的其他合金元素,如 Cr、Mo、Cu、Ni 等。与钢相比,铸铁熔点较低,通常为 1100~1250℃,密度为 6.7~7.6g/cm³,线胀系数约为 $10.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,塑性低,焊接性较差,使其在钎接结构中的应用受到一定的限制。

(1) 钎焊特点

铸铁按碳的存在状态(化合物或游离石墨)及石墨的存在形式(片状、球状、团絮状等)分为灰铸铁、球墨铸铁、可锻铸铁、白口铸铁和合金铸铁五大类,其中以灰铸铁和球墨铸铁应用最广。除了基体组织(铁素体、珠光体或铁素体+珠光体)之外,铸铁的性能在很大程度上是由石墨的形状、大小、分布和数量等所决定的。

在应用中,常要求将灰铸铁、可锻铸铁及球墨铸铁本身或与异种金属(大多是铁基金属)相连接,而白口铸铁则很少使用钎焊。铸铁的钎焊主要用于铸件之间或与其他金属件的连接,还用于铸铁损坏件的修补,如汽缸盖、机床床身及机架等。

在铸铁中存在的石墨状态的碳很难被钎料所润湿,阻碍其良好的冶金结合,给灰铸铁的钎焊带来了困难,而对可锻铸铁和球墨铸铁影响较小。凡遇到润湿困难的场合,在钎焊前就应该清理工件表面的石墨。

当灰铸铁、可锻铸铁被加热到它的临界(相变)温度以上时,正常存在的组织开始转变成奥氏体。若冷速过快,就要转变为马氏体,或者转变成含有网状渗碳体的细微珠光体组织,使热影响区性能变坏。因此,钎焊后应缓冷。灰铸铁、可锻铸铁的临界温度随成分而异,并且随硅含量的增加而逐步升高。球墨铸铁和可锻铸铁钎焊时,若钎焊温度高于 760℃,金相组织可能受到损害,所以钎焊应尽量在 760℃ 以下进行。

铸铁钎焊主要用于铸铁修补。在某些情况下,一些复杂的结构件难以实现一次整体铸造,可以采用钎焊方法将两件或多件铸件连接成一体(见图 6.4),在某些场合也可采用钎焊,将钢结构件或铜制零件与铸件连接成一个复合结构产品。

(2) 钎料和钎剂

适用于铁或钢的钎料均能适用于铸铁的钎焊。然而,更宜采用的是熔点较低的银基钎料,含镍的银基钎料对铸铁具有较大的亲和性,因而可获得强度较高的接头。铜和铜锌钎料也可以使用,但因它们的温度范围较大,使用时必须严格控制钎焊温度。含磷的铜基钎料不适用于铸铁,这是因为会生成脆性的铁-磷化合物而使接头变得很脆。

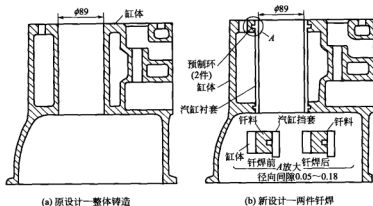


图 6.4 以钎焊结构代替整体铸造汽缸

在铜基钎料中常选用 BCu60ZnSn 、 BCu58ZnFe 或 BCu48ZnNi ，所钎焊的铸铁接头强度可达 $117\sim 147\text{MPa}$ 。若要降低钎焊温度及提高接头强度，则可选用 $49\text{Cu}10\text{Mn4Ni0.5Sn0.4Al36Zn}$ 钎料，钎焊接头强度可超过 200MPa 。用铜基钎料钎焊铸铁时可配合选用硼砂或硼砂与硼酸混合物钎剂。若选用 $\text{H}_3\text{BO}_3 40\% + \text{LiCO}_3 16\% + \text{Na}_2\text{CO}_3 24\% + \text{NaCl} 14.6\% + \text{NaF} 5.4\%$ 组成的钎剂，则效果更好。用银基钎料钎焊时可选用 QJ102 钎剂，接头间隙以 $0.05\sim 0.1\text{mm}$ 较好。

(3) 钎焊工艺

① 钎焊前准备 铸件的表皮常含有砂子、尘污、油垢和润滑脂等杂物，在钎焊前应将其清除。清除油污可采用有机溶剂擦洗的方法；而夹杂物的清除则可采用机械方法，如锉刀及钢丝刷清理等，也可对工件表面进行喷砂或喷丸。此外，可采取氧化火焰灼烧或用化学清理。此后，还有必要把表面暴露出来的石墨除去。

铸铁钎焊可采用火焰、炉中、感应及盐浴钎焊方法。要保证钎焊质量，焊前清理和清洗是十分重要的。待焊表面的氧化物、残砂及石墨都必须仔细清理干净。可采用喷丸或喷砂处理，用氧-乙炔焰烧去表面层石墨。也可用下述电化学法对表面进行综合处理，效果很好：将铸件浸入加有催化剂的盐槽中，熔盐温度保持在 $454\sim 510^\circ\text{C}$ 。先使铸件为负极、盐槽为正极，通直流电使熔盐起还原作用 5min ，去除砂粒和氧化物，接着改变电流极性，产生氧化反应 20min ，随后再产生还原反应 10min 。通过反复改变电流极性、交替进行氧化还原反应，完成表面清理和清洗，最后浸入水中冲洗去除残盐并干燥。

炉中钎焊通常采用放热性气体保护或空气炉。较大的铸件需预热，应多次添加钎剂。钎焊后应缓慢冷至 $70\sim 80^\circ\text{C}$ 再浸入水中去除残盐或残留钎剂。

为了保证获得均匀的接头间隙，通常要求用机器或锉刀来加工铸件表面。接头间隙应根据具体应用条件来确定，应考虑到待焊金属的热膨胀系数、加热方法和钎料的类型等。推荐的接头间隙为 $0.05\sim 0.13\text{mm}$ ，最大的间隙为 0.25mm 。

② 钎焊工艺要点 所有常规的钎焊方法都适用于铸铁的钎焊，钎焊方法的选择取决于工件的结构形状和尺寸。由于铸铁表面有 SiO_2 ，在保护氢气中钎焊效果不好，因此一般都使用钎剂。

对于较大的铸铁件用铜基钎料钎焊时，操作工序为：在清理好的钎焊表面上撒一层钎剂，然后把工件放进炉中（可用焦炭炉）加热或用焊炬加热，当工件加热到 800°C 左右时，

再加入补充钎剂，并把它加热到钎焊温度，再用钎料在接头边缘刮擦，使钎料熔化填入间隙。为了提高钎缝强度，铸铁工件钎焊后要在 700~750℃ 进行 20min 的退火处理。

③ 焊后处理 铸铁件钎焊后应有一定时间的保温，使接头质量得到提高。钎焊件快速冷却不仅会使母材得到不良的金相组织，还会导致钎缝或母材的开裂。因此，在钎焊后必须缓慢冷却。钎焊后过剩的钎剂及残渣一般用温水冲洗即可清除。如果难以去除，则先用质量分数为 10% 的硫酸水溶液或质量分数为 5%~10% 的磷酸水溶液清洗，然后再用清水洗净。

6.3 高温合金的钎焊

6.3.1 高温合金的类型及应用

(1) 高温合金的类型

高温合金又称为热强合金、耐热合金或超合金。我国高温合金是从 1956 年研制 GH3030 开始的，其发展的历程与国际接轨。高温合金按基体成分可以分为镍基、铁基和钴基合金三类；按其强化方式可分为固溶强化和沉淀强化高温合金；按生产工艺可分为变形、铸造、粉末冶金和机械合金化高温合金。

① 镍基合金 发展最快，应用也最广泛。镍基高温合金是以镍为基体（含量一般大于 50%）在 650~1000℃ 范围内具有较高的强度和良好的抗氧化、抗燃气腐蚀能力的高温合金。镍基高温合金按强化方式有固溶强化型合金和沉淀强化型合金。

② 铁基合金 是在 Fe-Ni-Cr 合金基体上添加合金元素发展起来的。虽然在高温抗氧化性和组织稳定性方面，比同类镍基合金稍差，但在适当的温度范围内具有良好的综合性能，而且成本低，因此在航空发动机上被广泛用于燃烧室、涡轮盘、机匣和轴类等零部件。

③ 钴基合金 具有良好的综合性能，但由于资源缺乏，发展受到限制。

(2) 高温合金的性能特点及应用

高温合金的性能主要是室温和高温下的强度和塑性以及工作高温下有很高的持久性能、蠕变和疲劳强度。表 6.40 列出部分高温合金的典型力学性能。高温合金制件通常有棒材、板材、盘材、丝材、环形件和精密铸件等品种，主要应用在航空航天、冶金、动力、汽车等工业部门。

表 6.40 高温合金的热处理工艺及典型力学性能

牌号	热处理工艺	试验温度 /℃	拉伸性能			持久性能	
			抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	伸长率 δ_5 /%	抗拉强度 σ_b /MPa	时间 t/h
GH1015	1150℃ AC	20	636 (737)	(314)	40 (48)	—	—
		800	(318)	(194)	(77)	(118)	(100)*
		900	176 (189)	(137)	40 (103)	68 (55)	20 (100)
GH1140	1080℃ AC	20	637 (637)	(255)	40 (46)	—	—
		700	225 (422)	(232)	40 (47)	(235)	(100)
GH1131	1130~1170℃ AC	20	735 (830)	—	34 (43)	—	—
		900	177 (215)	—	40 (63)	(97)	(100)
GH2132	900~1000℃ AC +700~720℃ AC	20	885	—	20	—	—
		650	686	—	15	392	100

续表

牌号	热处理工艺	试验温度 /℃	拉伸性能			持久性能	
			抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	伸长率 δ_5 /%	抗拉强度 σ_b /MPa	时间 t /h
GH150	1120℃ AC	20	707 (1231)	—	30 (23)	—	—
		800	633 (644)	—	10 (28)	246 (245)	30(97)
GH3030	980~1020℃ AC	20	686 (730)	—	30 (44)	—	—
		700	294 (266)	—	30 (72)	(103)	(100)
GH3039	1200℃ AC	20	735 (841)	(436)	40 (48)	—	—
		800	245 (284)	(137)	40 (76)	(78)	(100)
GH3044	1200℃ AC	20	735 (785)	(314)	40 (60)	—	—
		900	196 (226)	(118)	30 (50)	68 (51)	100 (100)
GH3128	交货状态	20	735 (891)	—	40 (54)	—	—
		950	176 (198)	—	40 (99)	55 (42)	20 (100)
GH22	交货状态	20	725 (795)	304 (368)	35 (48)	—	—
		815	(327)	(219)	(89)	110	24
GH99	1140℃ AC	20	1128 (1046)	(604)	30 (50)	—	—
		900	373 (478)	(361)	15 (40)	118 (118)	30 (100)
GH141	1065℃ 4h AC+ 760℃ 16h AC	20	1176 (1014)	882	12 (15)	—	—
		800	735 (779)	637	15 (18)	(300)	(100)
GH188	1180℃ WC 或 AC	20	860 (958)	380 (483)	45 (56)	—	—
		815	(580)	—	(66)	165 (154)	23 (100)
GH605	交货状态	20	890	370	35	—	—
		815	—	—	—	165	23
	1120℃ WC	20	940	—	60	—	—
		800	480	—	30	165	100

注：1. 除 GH4169 为普通棒材外，其余均为薄板的性能；AC 为空冷，WC 为水冷。

2. 表中数据为技术条件规定的数值；括号中为试验数据。

从 20 世纪 30 年代后期起，英、德、美等国就开始研究高温合金。第二次世界大战期间，为了满足新型航空发动机的需要，高温合金的研究和使用进入了蓬勃发展时期。20 世纪 40 年代初，英国首先在 80Ni-20Cr 合金中加入少量铝和钛，研制成第一种具有较高的高温强度性能的镍基合金。同一时期，美国开始用钴基合金制作发动机叶片。美国还研制出 Inconel 镍基合金，用以制作喷气发动机的燃烧室。

在先进的航空发动机中，高温合金用量占发动机总重量的 60% 以上，已从常规镍基合金发展成定向凝固、单晶和氧化物弥散强化高温合金，高温性能大幅度提高。高温合金还在能源、医药、石油化工等工业部门中的高温耐蚀、耐磨等领域得到广泛应用，是国防和国民经济建设中必不可缺的一类重要材料。

高温合金是指以 Fe、Ni 或 Co 为基体，为在承受较大的机械应力和要求具有良好表面稳定性的环境下进行高温服役而研制的一种合金，一般要求能在 600℃ 以上高温抗氧化和抗腐蚀，并能一定应力作用下长期工作。

在航空航天工业部门中, 高温合金主要用于涡轮发动机的高温部件, 如燃烧室的火焰筒、点火器和机匣、加热燃烧室的加热屏以及涡轮燃气导管等均采用了板材冲压焊接结构, 使用 800℃ 工作的 GH3039、GH1140 合金, 900℃ 工作的 GH1015、GH1016、GH1131、GH3044 和时效强化的 GH99 合金, 此外少量采用 980℃ 工作的 GH170 和 GH188 合金。涡轮部件中的涡轮盘主要采用了 GH4169 和 GH4133 合金。涡轮叶片和导向叶片大部分采用铸造高温合金, 如 K403、K417、K6C、DZ22、DZ125 等。

工业燃气轮机中的叶片广泛采用 K413、K218、GH864 等合金。柴油机增压涡轮还采用了 K218 合金。石油化工乙烯裂解高温部件采用了 GH180、GH600 等合金。冶金工业连轧导板、炉子套管采用了 K12、GH128、GH3044、GH3039 等高温合金。

(3) 几种先进的高温合金

① 定向凝固和单晶高温合金 晶界是合金高温时的薄弱环节。高温合金一般采用合金化方式加入一些强化晶界的元素来改善晶界的性能, 但更为有效的方法是采用定向凝固技术生成柱状晶, 消除与主应力垂直的横向晶界或生成单晶彻底消除晶界。定向凝固合金和单晶合金实质上都是采用定向凝固技术, 通过对合金凝固过程的控制, 使合金具有定向的柱状晶组织或单晶组织。

定向凝固合金从 20 世纪 70 年代开始应用于波音 747 飞机发动机的高温部件, 但单晶合金因性能和成本的原因发展缓慢, 直到 20 世纪 70 年代中期, 由于合金成分和热处理方面的突破, 单晶合金重新崛起, 并在 20 世纪 80 年代研制出一系列新型镍基单晶合金叶片。

定向凝固高温合金的组织特点是通过控制凝固方向使其成为平行的柱状晶组织。由于消除了横向晶界, 它在纵向受力时不存在垂直于受力方向的薄弱晶界, 大大提高了合金纵向的高温力学性能。几种定向凝固及单晶高温合金的化学成分见表 6.41。

表 6.41 几种定向凝固及单晶高温合金的化学成分 (质量分数)

合金	Cr	Co	Ti	Al	Mo	W	Ta	B	C	Zr	Hf	其他	Ni
DS M-M200(美)	8.4	10	1	5.5	0.6	10	3	0.015	0.15	0.05	1.4	—	余
PWA1480(美)	10	5	1.5	5.0	—	4	12	—	—	—	—	—	余
PWA1484(美)	5	10	—	5.6	2.0	6	9.8	—	—	—	0.1	RE 3	余
DZ22(中)	9	10	2	5.0	—	12	—	0.015	0.14	—	1.5	Nb 1	余
DD3(中)	9.5	5	2.3	5.7	4.0	5.2	—	—	—	—	—	—	余

PWA1480 是美国第一代单晶合金, 由于去掉了 C、B、Zr、Hf 等强化晶界的元素, 调整了 Al、Ti、W、Ta 等元素的含量, 使 γ' 相的体积分数达到 60% 以上, 具有很好的抗蠕变和抗氧化性能, 已在飞机发动机上得到应用。20 世纪 80 年代美国又发展了第二代单晶高温合金, 如 PWA1484, 这类合金具有更高的蠕变强度、优良的抗氧化和抗热疲劳性能。由于稀土元素的加入增加了 γ' 沉淀相的尺寸稳定性, 工作温度比第一代单晶合金的工作温度高出 28~50℃。通常工作温度每提高 25℃ 相当于提高叶片高温寿命约 3 倍, 在 JD-9D 发动机上的试验结果表明, 定向凝固合金叶片的寿命为普通铸造合金叶片的 2.5 倍, 而单晶高温合金叶片的寿命可达普通铸造合金叶片寿命的 5 倍。我国生产的 DD3 单晶高温合金的最高工作温度为 1040~1100℃, 适于制造喷气发动机的涡轮叶片和导向叶片。

② 氧化物弥散强化高温合金 它是一种含有均匀分布的超细氧化物物质点弥散强化的合金, 主要有两类: 一是镍基合金中加入 Y_2O_3 , 二是在铁基合金中加入 Y_2O_3 。这类高温合金虽也属第二相强化, 但与传统的第二相沉淀强化合金有根本的差别。这类合金中的第二相不是从基体中沉淀析出的碳化物等强化相, 而是通过特殊的机械合金化方式引入合金的弥散

氧化物相。由于所选的氧化物弥散强化相具有很高的热力学稳定性、很低的界面能、很细的颗粒度 ($<0.1\mu\text{m}$) 和理想的形态 (不带尖角), 所以在高温下不会分解, 不与基体反应, 不易聚集 (Y_2O_3 的聚集温度 $>1300^\circ\text{C}$), 在接近基体熔点时也不溶解。因此, 强化作用不像碳化物和 γ' 相那样容易消失, 而是可以保持到很高的温度。特别是由于氧化物弥散相是通过机械合金化方式引入基体的, 数量可控, 弥散度极好。

表 6.42 列出几种氧化物弥散强化高温合金的成分和性能。

表 6.42 几种氧化物弥散强化高温合金的成分和性能

合金	化学成分(质量分数)/%												持久性能 (1093℃)
	Fe	Ni	Cr	W	Mo	Ta	Ti	Al	B	Zr	C	Y_2O_3	
MA753	—	余	20	—	—	—	2.5	1.5	0.007	0.07	0.05	1.3	103MPa, 100h
MA754	—	余	20	—	—	—	0.5	0.3	—	—	0.05	0.6	103MPa, 100h
MA956	余	—	20	—	—	—	0.5	4.5	—	—	—	0.5	55MPa, 1000h
MA957	余	—	14	—	0.3	—	0.99	0.06	—	—	—	0.27	—
MA6000	—	余	15	4	2	2	2.5	4.6	0.01	0.15	0.05	1.1	145MPa, 1000h
MA760	—	余	20	3.5	2	—	—	6	0.01	0.15	0.05	0.95	—

20 世纪 70 年代以后新工艺的开发成为提高高温合金性能的重要手段。定向凝固高温合金、单晶合金和氧化物弥散强化合金等相继出现并推动了高温合金的发展。这些在特殊工艺条件下制造出来的具有特殊成分、组织结构和优异高温性能的先进高温合金, 对后续加工和焊接提出了更为严格的要求, 特别是对焊接接头高温性能的要求, 使一些常规的焊接技术无法应用。

6.3.2 高温合金的钎焊特点

(1) 表面氧化膜的影响

高温合金均含有较多的铬, 加热时表面形成稳定的 Cr_2O_3 , 比较难以去除。此外, 镍基高温合金均含铝和钛, 尤其是沉淀强化高温合金和铸造合金的铝、钛含量更高。铝和钛对氧的亲合力比铬大得多, 加热时极易氧化。因此, 如何防止或减少镍基高温合金加热时的氧化以及去除其氧化膜, 是镍基高温合金钎焊时考虑的首要问题。

钎焊镍基高温合金时不建议用钎剂来去除氧化物, 尤其是在高的钎焊温度下。这是因为钎剂中的硼酸或硼砂在钎焊温度下与母材起反应, 降低母材表面的熔化温度, 促使钎剂覆盖处的母材产生熔蚀; 并且硼砂或硼酸与母材发生反应后析出的硼可能渗入母材, 造成晶间渗入, 对薄工件来说是很不利的。所以镍基高温合金一般都在保护气氛, 尤其是在真空中钎焊。

母材表面氧化物的形成、去除与保护气氛的纯度以及真空度密切相关。对于 Al 和 Ti 含量低的合金, 如 GH3030、GH3037、CH3044、GH3128 等钎焊加热时, 对真空度的要求基本上与不锈钢相同, 即热态真空度不应低于 10^{-2}Pa ; 对于 Al、Ti 含量较高的合金, 如 GH4033、GH4037, 表面氧化物的生成与去除不仅与真空度, 而且与加热温度密切相关。例如将表面抛光过的 GH4037 合金在 $2 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 真空中加热到 1000°C , 表面呈微黄色, 主要被 Al_2O_3 膜覆盖, 其厚度约为 10nm, 即由加热前的 2.5nm 增厚到 1000°C 真空加热后的 10nm。由于铝对氧的亲合力大于钛对氧的亲合力, 所以铝抑制了钛的氧化。当 GH4037 合金加热到 1150°C 后, 表面的 Al_2O_3 膜消失。

GH4037 合金在 1000°C 真空加热时表面虽形成了薄氧化膜, 但它并不影响钎料的润湿,

其原因是氧化膜的线胀系数同高温合金的差别很大,因而在该温度下氧化膜发生开裂,熔融钎料渗入这些裂纹,在母材和氧化膜之间铺展,并将氧化膜抬起,浮在钎料表面上。如果钎焊的是搭接接头,这些氧化膜将留在钎缝内形成夹杂,对钎焊接头起不利作用。所以在实际焊接操作中,仍应尽量避免合金表面在加热时发生氧化。对于 Al、Ti 含量更高的铸造镍基合金,尤其要保证热态的真空度不低于 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ Pa,钎焊温度也不能太低,以保证钎料的润湿。

(2) 钎焊工艺与热处理制度的匹配性

无论是固溶强化,还是沉淀强化的镍基高温合金,都必须将其合金元素及其化合物充分固溶于基体内,才能取得良好的高温性能。沉淀强化合金固溶处理后还必须进行时效处理,以达到弥散强化的目的。因此,钎焊工艺参数应尽可能与合金的热处理制度相匹配,即钎焊温度尽量与固溶处理的加热温度相一致,以保证合金元素的充分溶解。

钎焊温度过高,会造成晶粒长大,影响合金性能;钎焊温度过低,不能使合金元素完全溶解,达不到固溶处理的效果,钎焊温度是钎焊高温合金最主要的参数。由于高温合金焊件使用于高温条件下,有时要承受大的应力,为适应这种使用条件,提高钎缝组织的稳定性和重熔温度、增强接头强度,往往在钎焊后进行扩散处理。

(3) 应力开裂

一些镍基高温合金,特别是沉淀强化合金有应力开裂的倾向。钎焊前必须充分去除加工过程中形成的应力,钎焊时应尽量减小热应力,使应力开裂的可能性降到最低限度。

6.3.3 高温合金钎焊用钎料

高温合金常常在恶劣的条件下工作,选用钎料时首先应考虑钎焊部位的工作条件及要求,如使用温度、工作介质、承受何种应力等;第二应考虑母材的特性和热处理制度的要求;第三应考虑接头形式、焊接部位厚度、装配间隙、焊后加工处理等因素。

(1) 镍基和钴基钎料

镍基和钴基钎料具有良好的抗氧化性、耐腐蚀和热强性能,并具有较好的钎焊工艺性能,经钎焊热循环不会产生开裂,因此适用于高温合金部件的钎焊,是应用最多的钎料。镍基钎料是在镍基中加入 Cr、Mn、Co 形成固溶体,加入 B、Si、P、C 形成共晶元素,以控制钎料的热强性,提高钎料的高温强度,还可以提高钎料在高温合金中的润湿能力。常用镍基钎料有 BNi74CrSiB、BNi75CrSiB、BNi82CrSiB、BNi71CrSi 等。钴基钎料一般为钴-铬-硼系合金,为了降低钎料的熔点和提高其高温性能,常加适量的硅和钨,如 BCo50CrNiW、BCo47CrWn 等。钎料中加入不同量的合金元素,其性能不同,应用也不同。表 6.43 列出镍基和钴基钎料的适用范围。

表 6.43 镍基和钴基钎料的适用范围

项目	钎料牌号								
	BNi74CrSiB	BNi75CrSiB	BNi82CrSiB	BNi92SiB	BNi93SiB	BNi71CrSi	BNi89P	BNi76CrP	BNi6MnSiCu
高温下受大应力部件	A ^①	A	B	B	C	A	C	C	C
受大静力部件	A	A	A	B	B	A	C	C	A
薄壁构件	C	C	B	B	B	A	A	A	C
原子反应堆构件	×	×	×	×	×	A	C	A	×
大的可加工的钎角	B	B	C	C	C	C	C	C	C

续表

项目	钎料牌号									
	BNi74CrSiB	BNi75CrSiB	BNi82CrSiB	BNi92SiB	BNi93SiB	BNi71CrSi	BNi89P	BNi76CrP	BNi6MnSiCu	300
与液体钠或钾接触件	A	A	A	A	A	A	C	A	×	A
用于紧固件的接头	C	C	B	B	B	B	A	A	A	C
接头强度	1 ^①	1	1	2	3	1	4	2	1	2
与钎焊母材的溶解和扩散作用	1	1	2	2	3	4	4	5	3	5
流动性	3	3	2	2	3	2	1	1	1	6
抗氧化性	1	1	3	3	5	2	5	5	4	1
推荐钎焊温度/℃	1175	1175	1040	1040	1120	1190	1065	1065	1065	1200
接头间隙/mm	0.05~0.125	0.05~0.10	0.025~0.125	0~0.05	0.05~0.10	0.025~0.10	0~0.075	0~0.075	0~0.05	0.1~0.4

① A—最好；B—满意；C—不很满意；×—不适用。

② 1~6 由高到低，1 为最高，6 为最低。

由于镍基和钴基钎料中含有较多的 B、Si 或 P 元素，会形成较多的硼化物、硅化物和磷化物脆性相，使钎料变形能力较差，不能制成丝或箔材，通常以粉状供应，使用时需要用粘接剂调成膏状涂于焊接处。但用粘接方法装置钎料，既不方便，又不易控制钎料加入量，目前可采用非晶态工艺制成的箔状钎料或粘带钎料。

非晶态镍基箔状钎料带宽 20~100mm、厚度 0.025~0.05mm，带材具有柔韧性，可冲剪成形，使用量容易控制，装配也方便。粘带镍基钎料是由粉状镍基钎料和高分子粘接剂混合经轧制而成。粘带钎料宽度为 50~100mm、厚度 0.1~1.0mm。粘带钎料中的粘接剂在钎焊后不留残渣，不影响钎焊质量。它可以控制钎料用量和均匀地加入，很方便用于焊接面积大和结构复杂的焊件。

(2) 铜基和银基钎料

铜基和银基钎料可用于工作温度 200~400℃ 的铁基和镍基固溶合金结构件。用银基钎料钎焊固溶强化镍基合金时，钎焊温度不会影响母材的性能，但从避免应力开裂的角度出发，以采用熔化温度较低的钎料为宜，如 BAg45CuZnCd、BAg56CuZnSn、BAg50CuZnSnNi、BAg40CuZnSnNi 等，以减小钎焊应力。

采用银基钎料钎焊沉淀强化镍基高温合金时，钎焊温度不应超过母材的时效强化温度，以免母材发生失效而降低其性能。也可采用先将合金固溶处理，再采用熔化温度较高的钎料，如 BAg72CuNiLi、BAg56Cu38Zn5Ni1 钎料在高于合金的时效温度下钎焊，然后再进行时效处理，钎焊件就不会在时效加热过程中因钎料的熔化而影响其性能。

用银钎料钎焊时可选用钎剂 FB102。因钎焊温度不高，钎剂同母材的反应较弱，不会因钎剂中硼的析出而影响合金的表面。钎焊含铝量高的沉淀强化高温合金时，应在 FB102 钎剂中添加质量分数为 10%~20% 的硅氟酸钠，或者在 FB102 钎剂中加入质量分数为 10%~20% 的铝钎剂（如 FB201 等），以增强钎剂去除氧化铝的能力。当钎焊温度超过 900℃，则应选用钎剂 FB105，但钎焊加热温度不宜过高，钎焊时间要短，以免钎剂同母材发生强烈的反应。

铜基钎料不能用于钎焊钴基合金，因为铜会污染母材，引起微裂纹。铜磷钎料不适用于

钎焊高温合金。用纯铜做钎料时,均需在保护气氛和真空下钎焊,钎焊温度为 1100~1150℃。在该温度下,零件的内应力已被消除。又因零件属于整体加热,热应力小,焊件不会产生应力开裂现象。

(3) 其他钎料

金基钎料适用于钎焊各类高温合金。这类合金具有优异的钎焊工艺性、塑性、抗氧化性和抗腐蚀性,高温性能较好,与母材作用弱等,在航空、航天和电子工业得到广泛的应用。典型的金基钎料有 BAu80Cu 和 BAu82Ni,但这类钎料中含有较多的贵金属,价格昂贵。

锰基钎料可用于在 600℃ 下工作的高温合金构件。这类钎料塑性良好,可制成各种形状,与母材作用弱,但其抗氧化性较低。锰基钎料主要采用保护气体钎焊,不适用于火焰钎焊和真空钎焊。

含钯钎料主要有银-铜-钯、银-钯-锰和镍-锰-钯等系钎料。这类钎料具有良好的钎焊工艺性。银-铜-钯系钎料的综合性能最好,但钎焊接头的工作温度较低(不高于 427℃)。虽然镍-锰-钯系钎料的熔点较低,但接头高温性能较高,可在 800℃ 下工作。

6.3.4 高温合金的钎焊工艺

(1) 接头设计

因为高温合金钎缝的强度低于母材,不能满足使用要求,一般不采用对接形式,推荐采用搭接接头,通过调整搭接长度增大接触面积,提高接头强度。此外,搭接接头的装配要求也相对比较简单,便于生产。接头的搭接长度一般为组成接头中薄件厚度的 3 倍,对于在 700℃ 以下工作的接头,其搭接长度可增大到薄件厚度的 5 倍。

接头的装配间隙对钎焊质量和接头强度有影响。间隙过大时,会破坏钎料的毛细作用,钎料不能填满接头间隙,钎缝中存在较多硼、硅脆性共晶组织,还可能出现硼对母材晶界渗入和熔蚀问题。高温钎焊接头的间隙一般为 0.02~0.15mm,适宜的间隙可根据母材的物理化学性能、母材与钎料的浸润性和钎焊工艺等因素通过试验确定。

(2) 焊前清理及装配

焊前应彻底清除焊件和钎料表面上的氧化物、油污和其他外来物,并在储运和装配、定位等工序中保持清洁。清理方法可采用化学法清除氧化物,用超声波清除污物。

焊件应精密装配,保证装配间隙,控制钎料加入量,并用适当的定位方法保持焊件和钎料的相对位置。高温合金钎焊前的状态推荐为固溶或退火状态,尤其是对铝、钛含量较高的时效强化合金。

(3) 钎焊工艺参数

为了防止母材应力开裂,必须尽量减小零件的内应力,如将经冷加工的零件在钎焊前进行去应力处理;钎焊时加热尽量均匀以及零件在钎焊加热过程中能自由膨胀和收缩等。但是对于沉淀强化高温合金来说,在时效过程中将不可避免地形成内应力,对钎焊时的应力开裂特别敏感。最有效的措施是先将零件进行固溶处理,然后在稍高于时效强化处理的温度下进行钎焊,最后进行时效处理。这样既可减少应力开裂的可能性,又不会因钎焊温度过高而发生时效现象。

镍基高温合金绝大部分是在真空或保护气氛炉中钎焊的。使用保护气氛炉中钎焊时,对气体纯度要求很高;使用氩或氢作为保护气体时,对于铝、钛的质量分数小于 0.5% 的高温合金,要求其露点低于 -54℃。但铝、钛含量增多时,合金表面在加热时仍发生氧化,必须采取以下措施。

- ① 添加少量钎剂,如 FB105,利用钎剂来去除氧化膜,但钎剂加入量一定不能多。
- ② 零件表面镀镍,镍层厚度为 25~38μm。

③ 将零件在湿氢中预先氧化,然后用硝酸和氢氟酸混合液去掉表面上的铝和钛的氧化物,使表面不再含铝和钛,从而达到防止钎焊加热时形成铝、钛氧化物的目的。

④ 将钎料预先喷涂在待钎焊表面上。

⑤ 附加少量气体钎剂,如三氟化硼。

目前,真空钎焊已在很大程度上取代了保护气氛钎焊。这是因为真空钎焊能获得更好的保护效果和钎焊质量。对于铝、钛的质量分数小于4%的高温合金,表面不必进行特殊的预处理,就能保证钎料的润湿。当合金的铝、钛的质量分数超过4%时,表面应镀 $20\sim 30\mu\text{m}$ 的镍层。镀镍厚度对钎接头强度是有影响的,镀层太薄对合金表面不起保护作用;镀层太厚也将降低接头强度。也可将零件放在盒内真空钎焊,盒中再放吸气剂,如锆在高温下的吸气作用,促使在盒内形成一个局部高真空,防止合金表面氧化。镍基高温合金钎焊时的热态真空度应不低于 10^{-2}Pa 。图6.5示出真空钎焊、氢气中钎焊加钎剂和氢气钎焊加镀镍的三种钎焊方法的比较,从图中可以看出,真空钎焊的接头强度最高。

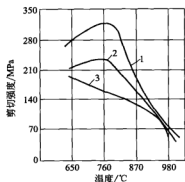


图 6.5 用 BNi71CrSi 钎料钎焊的 R-235 合金
(Ni-16Cr-5.5Mo-8Fe-1.5Co-3Ti-1.5Al)

接头的剪切强度

1—真空；2—H₂+钎剂；3—H₂+镀镍

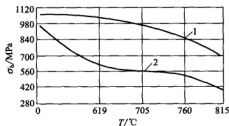


图 6.6 Inconel 702 合金的抗拉
强度与钎焊温度的关系

1—正常热处理；2—1220°C 钎焊 + 正常热处理

钎焊温度和保温时间是保护气体钎焊和真空钎焊的主要工艺参数。钎焊温度一般应高于钎料液相线 $30\sim 50^{\circ}\text{C}$ 。某些流动性差的钎料其钎焊温度需要比液相线温度高出 100°C 。适当提高钎焊温度,可降低钎料的表面张力,改善润湿性和填充能力。但钎焊温度过高,会造成钎料流失,还可能导致因为钎料与母材的作用过分而引起熔蚀、晶界渗入、形成脆性相以及母材晶粒长大问题等。图 6.6 示出 Inconel 702 合金 (Ni-15Cr-0.35Fe-3Al-0.5Ti) 经 1220°C 钎焊以及随后的正常热处理后的性能。由于钎焊温度过高,晶粒发生长大,即使焊后经过热处理也不能回复其性能。

保温时间取决于母材特性、钎焊温度以及装炉质量等因素。保温时间过长,也会出现与钎焊温度过高类似的问题。在确定高温合金钎焊工艺参数时,还应考虑与母材的热处理制度匹配。

镍基钎料是在镍中添加较多的硼或硅元素以达到降低熔化温度的目的。在硼和硅元素降低钎料熔化温度的同时,也在钎料中形成相当多的硼化物和硅化物相,使钎料变脆。因此钎焊高温合金时钎接头的组织性能与钎焊间隙大小密切相关。

(4) 接头缺陷及防止

钎焊接头中的缺陷主要有未焊透、熔蚀和气孔。

未焊透对气密性要求严格的接头是不允许的缺陷,因此应避免。消除未焊透、提高钎着

率的方法有:正确设计钎焊接头各参数,特别是钎缝面积大时,应设计有排气沟槽;加强焊前处理,使钎料能很好地在母材上铺展和填充;调整钎焊工艺参数,使钎料流满钎缝。

当钎料选择不合适或钎焊工艺参数不当时,易引起钎料过度溶解母材而形成熔蚀。这种缺陷,在钎焊薄片时应特别注意。防止方法是:选择含硼、碳元素低的钎料;限制钎焊温度最高值和限制保温时间。

大间隙钎焊时常出现缩孔缺陷。当缩孔较小时,对接头性能影响不大,但连续的较大面积的缺陷应避免。可通过调整装配间隙、适当提高钎焊温度和控制冷却速度的方法来消除缩孔。

(5) 接头组织与力学性能

高温合金钎焊接头组织及性能与母材化学成分、所用钎料、钎缝间隙、钎焊工艺参数和焊后处理等因素有关。研究表明,采用硅、硼含量较高的镍基钎料时,会引起钎料和母材发生作用而导致熔蚀和钎料元素沿母材晶界渗入现象,并且这两种现象均随钎焊温度升高和保温时间而加剧,其中钎焊温度影响较大。防止熔蚀和晶界渗入现象的措施是选用硅、硼含量较低的钎料和在保证钎焊过程正常进行的情况下,采用较低的钎焊温度和较短的保温时间。

选用适当的钎料和钎焊工艺,可获得性能较好的钎焊接头。几种高温合金钎焊接头的力学性能列于表 6.44。

表 6.44 几种高温合金钎焊接头的力学性能

合金牌号	钎料牌号	钎焊条件	试验温度 /℃	接头强度		备注
				抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	
GH1140	BNi70CrSiMoB (HLNi-2)	1200℃氩气保护钎焊	20	—	570	钎料中 Nb≤0.1%
			900	—	73.5	
GH3030	BNi75CrSiB (GHL-6) BNi70CrSiB (GHL-6)	1100℃氩气保护钎焊 1080~1118℃真空钎焊	600	—	570~630	—
			700	—	360~390	
			800	—	200~220	
			600	—	220	
			700	—	228	
			800	—	224	
GH3044	BNi70CrSiBMo (HLNi-2) BNi77CrSiB (GHL-6)	1080~1180℃真空钎焊 1100℃氩气保护焊	20	—	234	—
			900	—	162	
			1100	—	74	
			20	—	300	
			800	—	270	
			900	—	114	
GH4169	BAu82Ni (HLAuNi17.5)	1030℃真空钎焊	20	—	320	—
			538	—	220	
GH141	BNi70CrSiB (HL-5)	1170℃真空钎焊	25	370	230	—
			648	400	255	
			870	245	150	
GH188	BNi70CrSiB (HL-5)	1170℃真空钎焊	20	—	308	—
			648	—	260	
			870	—	90	
K403+ GH3044	BNi70CrSiB (HL-5) BNi77CrBSi+ 40%Ni粉	1080~1180℃真空钎焊 1200℃氩气保护焊	—	σ^D	ϵ^D	钎料中 C 0.5%
			800	49.0	≥80	
			900	9.8	≥70	
			20	310	—	
			900	220	—	
			1000	150	—	
K403	BNi77CrBSi	1130℃真空钎焊	950	270	—	—

① σ 为持久拉伸应力, MPa; ϵ 为相应拉伸应力下的断裂时间, h。

国外用贵金属钎料钎焊的高温合金接头性能如下。表 6.45 是银-钼-钯和镍-钯-钼钎料钎焊的 NiCr20Co18Ti 合金接头的应力-破坏性能。表 6.46 是 Ni-Mn-Pd、Ag-Pd-Mn 和 Au-Ni 钎料钎焊的高温合金接头的高温强度。表 6.47 是 Ni-Mn-Pd、Ag-Pd-Mn 和 Au-Ni 钎料钎焊的高温合金接头的应力-破坏性能。表 6.48 是含钯钎料钎焊的 NiCr20Co18Ti 合金接头的高温强度。

表 6.45 银-钼-钯和镍-钯-钼钎料钎焊的 NiCr20Co18Ti 合金接头的应力-破坏性能

钎料	成分	母材	试验温度/℃	蠕变极限/MPa		
				500h	1000h	5000h
SPM1	75Ag-20Pd-5Mn	NiCr20Co18Ti	800	20	15	10
SPM2	64Ag-33Pd-3Mn	NiCr20Co18Ti	800	27	24	15
SPM2		NiCr20Co18Ti	950	24	8	3
NMP	48Ni-31Mn-21Pd	NiCr20Co18Ti	800	47	39	32
NMP		NiCr20Co18Ti	950	—	8	—

表 6.46 Ni-Mn-Pd、Ag-Pd-Mn 和 Au-Ni 钎料钎焊的高温合金接头的高温强度

母材	母材屈服强度/MPa				钎料	接头抗拉强度/MPa			
	20℃	400℃	500℃	600℃		20℃	400℃	500℃	600℃
X8NiCrAlTi7520	750	720	710	700	NMP	520	550	550	600
					SPM2	650	600	400	380
					Au-18Ni	780	700	600	500

表 6.47 Ni-Mn-Pd、Ag-Pd-Mn 和 Au-Ni 钎料钎焊的高温合金接头的应力-破坏性能

母材	母材				钎料	接头持久强度/MPa					
	持久强度 (650℃,1000h) /MPa	屈服强度/MPa				100h			1000h		
		400℃	500℃	600℃		400℃	500℃	600℃	400℃	500℃	600℃
X10NiCrTi7020	—	300	300	260	SPM2	—	220	100	—	200	48
					NMP	—	330	220	—	320	80
					Au-18Ni	—	78	18	—	48	<10
X8NiCrAlTi7520	400	720	710	700	NMP	—	290	270	—	250	70
X8NiCoCrTi552020	480	750	740	730	NMP	—	280	170	—	240	70

表 6.48 含钯钎料钎焊的 NiCr20Co18Ti 合金接头的高温强度

钎料	成分	NiCr20Co18Ti 接头的高温强度/MPa													
		撕裂强度							抗剪强度						
		20℃	200℃	400℃	500℃	600℃	700℃	800℃	20℃	200℃	400℃	500℃	600℃	700℃	800℃
SPM1	75Ag-20Pd-5Mn	540	400	250	320	300	—	—	250	—	—	—	140	110	100
SPM2	64Ag-33Pd-3Mn	610	550	410	350	300	—	—	250	—	—	230	170	—	140
NMP	48Ni-31Mn-21Pd	—	—	—	—	—	—	—	340	—	—	280	280	260	150
PN1	60Pd-40Ni	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

6.3.5 高温合金的大间隙钎焊

高温合金铸件锻件的钎焊，其间隙一般大于 0.3mm，局部可达到 0.6mm 以上，由此产

生了大间隙钎焊工艺。大间隙钎焊的原理是采用金属粉或合金粉作为高熔点组分与钎料（低熔点组分）组成黏度大的黏滞物，填充并滞留在间隙中，依靠液态钎料润湿，流布于母材和合金粉之间，并相互作用而形成牢固的钎焊接头，将零件连接起来。大间隙钎焊工艺包括接头准备、钎料和合金粉的选用及填加、钎焊和扩散处理等工艺环节。

(1) 接头准备

大间隙钎焊的接头设计除产品结构要求外应设计为有利于合金粉和钎料填加的形式，如丁字接头、小搭接长度的搭接接头。钎焊间隙因钎焊工艺的不同而不同，一般在 $0.3 \sim 0.8\text{mm}$ 范围。接头在焊前应该仔细清理待焊表面。

(2) 合金粉和钎料的选择和填加

合金粉和钎料应根据高温合金焊件使用要求、母材特性和接头形式选择。常用合金粉有镍粉、 $80\text{Ni}-20\text{Cr}$ 粉、K3 合金粉、K5 合金粉、FGH95 合金粉等。选用与母材相同成分的合金粉为最好。

当焊件工作温度低、承受应力小时，选用纯镍粉。当焊件工作温度高、承受应力较大时，选用 K3、K5 或 FGH95 合金粉。钎料的选用除一般原则外应选择固-液相温度区间较大的钎料，这种钎料流动性差，易滞留在接头间隙中。合金粉和钎料的粒度不宜过大或过小。粒度越小，表面积加大，合金粉与钎料作用面积加大，易使混合料熔点变高，钎缝中形成缩孔；粒度过大，合金粉之间空隙过大，钎料填充后形成大块共晶组织。一般合金粉粒度为 $0.071 \sim 0.154\text{mm}$ 。合金粉与钎料的比例一般为 $(35:65) \sim (45:55)$ 之间。

合金粉与钎料应加入间隙中，方式有混合法和预置法两种，预置法又分静压法和预烧结法两种。

混合法是将一定成分、一定粒度的合金粉和钎料按照一定的比例混合均匀，然后放置在钎焊间隙中并捣实。该方法的优点是合金粉与钎料可以按比例加入，混合料用量也便于控制；其缺点是混合料是粉末状态，钎焊后钎缝金属收缩，造成钎缝仍未填满和钎缝中有较多的缩孔。

预置法是将一定成分和粒度的合金粉预先置入间隙中，然后施加静压使合金粉密实或进行烧结，再在钎缝口处填加钎料，当加热到钎焊温度时，钎料熔化，沿合金粉空隙流淌钎缝，形成牢固接头。预置法的优点是可以消除钎缝中的大部分孔洞，防止大块脆性相；其缺点是合金粉与钎料的比例不能控制，并且增加一道烧结工序。若从保证钎焊质量出发，最好采用预置烧结法。

(3) 钎焊工艺

大间隙钎焊主要工艺参数包括钎焊温度和保温时间。钎焊温度不宜过低，一般应高于正常钎焊温度 10°C 左右。钎焊温度偏低，钎料与合金粉作用较弱，钎料中的硼很少扩散，使钎缝中形成较多的硼化物脆性相。若钎焊温度高一些，钎料与合金粉相互溶解，硼向合金粉的扩散增强，钎缝中镍的固溶体比例增加，大块镍-硼化物共晶消除，钎缝中仅存在不连续分布的复合化合物相，改善了钎缝组织。保温时间也应比正常钎焊的保温时间长。时间过短，钎缝中的合金粉与钎料作用不充分，易出现大块共晶组织，而且孔洞缺陷也多。只有充分的保温时间，组织较均匀，缺陷也会减少。

扩散处理是为改善钎缝组织，提高钎缝质量和重熔温度，提高钎焊接头的力学性能，尤其高温持久性能而进行的。扩散温度一般选择母材固溶处理温度或比钎焊温度稍高的温度。温度较高时，加快 B、Si 元素的扩散，促使共晶组织产生转变，形成高熔点的化合物相，呈不连续分布。扩散时间一般较长，从 $2 \sim 3\text{h}$ ，依不同合金粉、钎料和母材而选择不同时间，以达到组织改善或均匀化目的。

6.4 高硬度耐磨材料的钎焊

6.4.1 陶瓷与金属的钎焊

陶瓷是指以各种金属的氧化物、氮化物、碳化物、硅化物为原料,经适当配料、成形和高温烧结等工序人工合成的无机非金属材料。与金属材料相比,陶瓷具有许多独特的性能。这类材料一般是由共价键、离子键或混合键结合而成,键合力强,具有很高的弹性模量和硬度。陶瓷材料的理论强度高于金属材料,但因其成分、组织不如金属那样单纯,并且陶瓷内部的缺陷多,所以陶瓷的实际强度比金属低。在室温下陶瓷几乎不具有塑性。

陶瓷是一种无机非金属材料,按其应用特性可分为功能陶瓷和工程结构陶瓷两大类。功能陶瓷包括电子陶瓷、高温陶瓷、光学陶瓷、高硬陶瓷等。功能陶瓷具有电绝缘性、半导体性、磁性、化学吸附性、生物适应性、耐辐射性等多种功能,且具有相互转化功能。工程结构陶瓷强调材料的力学性能,以其具有的耐高温、高强度、超硬度、高绝缘性、高耐磨性、抗腐蚀等性能,在工程领域得到广泛应用。

(1) 陶瓷与金属的钎焊特点

陶瓷材料的加工性能差,塑性和冲击韧性低,耐热冲击能力弱以及制造尺寸大而形状复杂的零件较为困难,因此陶瓷通常都是与金属材料一起组成复合结构来应用。当陶瓷与其他材料(一般为金属材料)连接时,一旦确定好适当的接头设计及连接技术时,陶瓷将给部件提供附加功能并改善其应用性能。所以陶瓷与金属材料之间的可靠连接是推进陶瓷材料应用的关键。

由于陶瓷材料与金属原子结构之间在本质上的差别,加上陶瓷材料本身特殊的物理化学性能,因此,无论是与金属连接还是陶瓷本身的连接都存在不少问题。当陶瓷与金属连接时,需要在连接材料之间作一个界面。这个界面材料应符合以下几点要求。

- 界面材料与被焊材料有不同的线胀系数。
- 结合类型,也就是离子/共价键结合。
- 陶瓷与金属间晶格的错配。

陶瓷与金属材料焊接中出现的主要问题如下。

① 陶瓷与金属焊接中的热膨胀与热应力 陶瓷的线胀系数比较小,与金属的线胀系数相差较大,通过加热连接陶瓷与金属时,接头区会产生残余应力,削弱接头的力学性能,残余应力较大时还会导致连接陶瓷接头的断裂破坏。

控制应力的方法之一是在焊接时尽可能地减少焊接部位及其附近的温度梯度,控制加热和冷却速度,降低冷却速度有利于应力松弛而使应力减小。另一个减小应力的办法是采用金属中间层,使用塑性材料或线胀系数接近陶瓷线胀系数的金属材料。

② 陶瓷与金属很难润湿 陶瓷材料润湿性很差,或者根本就不润湿,采用钎焊或扩散焊的方法连接陶瓷材料,由于熔化的金属在陶瓷表面很难润湿,故难以选择合适的钎料。为了使陶瓷与金属达到钎焊的目的,最基本的条件之一是使钎料对陶瓷表面产生润湿,或提高对陶瓷的润湿性,最后达到钎焊连接。例如,采用活性金属 Ti 在界面形成 Ti 的化合物,获得良好的润湿性。

此外,在陶瓷连接过程中,往往在陶瓷表面进行金属化处理(用物理或化学的方法涂上一层金属),然后再进行陶瓷与陶瓷或陶瓷与其他金属的连接。这种方法实际上就是把陶瓷与陶瓷或陶瓷与其他金属的连接变成了金属之间的连接,但是这种方法的结合强度不高,主要用于密封的焊缝。

③ 易生成脆性化合物 由于陶瓷和金属的物理化学性能差别很大,连接时除存在着键

型转换以外,还容易发生各种化学反应,在结合界面生成各种碳化物、氮化物、硅化物、氧化物以及多元化合物等。这些化合物硬度高、脆性大,是造成接头脆性断裂的主要原因。

确定界面脆性化合物相时,由于一些轻元素(C、N、B等)的定量分析误差较大,需制备多种试样进行标定。多元化合物的相结构确定一般通过X射线衍射方法和标准衍射图谱进行对比,但有些化合物没有标准图谱,使物相确定有一定的难度。

④ 陶瓷与金属的结合界面 陶瓷与金属接头在界面间存在着原子结构能级的差异,陶瓷与金属之间是通过过渡层(扩散层或反应层)而焊合的。两种材料间的界面反应对接头的形成和性能有很大的影响。接头界面反应和微观结构是陶瓷与金属焊接研究中的重要课题。

陶瓷材料主要含有离子键或共价键,表现出非常稳定的电子配位,很难被金属键的金属钎料润湿,所以用通常的熔焊方法使金属与陶瓷产生熔合是很困难的。用金属钎料钎焊陶瓷材料时,要么对陶瓷表面先进行金属化处理,对被焊陶瓷的表面改性,或是在钎料中加入活性元素,使钎料与陶瓷之间有化学反应发生,通过反应使陶瓷的表面分解形成新相,产生化学吸附机制,这样才能形成结合牢固的陶瓷与金属结合的界面。

(2) 陶瓷与金属钎焊方法

目前陶瓷与金属连接中应用最多的是钎焊连接。其原理是利用陶瓷与金属之间的钎料在高温下熔化,其中的活性组元与陶瓷原料发生化学反应,形成稳定的反应梯度层使两种材料结合在一起。

陶瓷/金属钎焊一般分为间接钎焊和直接钎焊。

间接钎焊(也称为两步法)是先在陶瓷表面进行金属化,再用普通钎料进行钎焊。陶瓷表面金属化的方法最常用的是Mo-Mn法,此外还有物理气相沉积(PVD)、化学气相沉积(CVD)、热喷涂法以及离子注入法等。间接钎焊工艺复杂,应用受到一定限制。

直接钎焊法(也称为一步法)又叫活性金属化钎焊法,是在钎料中加入活性元素,如过渡金属Ti、Zr、Hf、Nb、Ta等,通过化学反应使陶瓷表面发生分解,形成反应层。反应层主要由金属与陶瓷的化合物组成,这些产物大多表现出与金属相同的结构,因此可以被熔化的金属润湿。直接钎焊法可使陶瓷结构件的制造工艺变得简单,成为近年来研究的热点之一。直接钎焊陶瓷的关键是使用活性钎料,在钎料能够润湿陶瓷的前提下,还要考虑高温钎焊时陶瓷与金属线胀系数差异是否会引起裂纹。在陶瓷和金属之间插入中间缓冲层可有效降低应力,提高接头强度。直接钎焊的局限性在于接头的高温强度较低以及大面积钎焊时钎料的铺展问题。

陶瓷与金属钎焊方法的分类、原理及适用材料见表6.49。陶瓷与金属钎焊采取的工艺措施有下述几种。

表 6.49 陶瓷-金属钎焊方法的分类、原理及适用材料

分类	原 理	适用材料	说 明
Mo-Mn 法	以 Mo 或 Mo-Mn 粉末(粒度为 3~5 μm)同有机溶剂混合成膏剂作钎料,涂于陶瓷表面,在水蒸气气氛中加热进行钎焊	陶瓷-金属连接	广泛用于 Al_2O_3 等氧化物陶瓷与金属的连接,如各种电子管和电气机械中陶瓷与金属连接部位的密封
活性金属化法	利用对氧化性的金属(Ti、Zr、Nb、Ta等)添加某些金属(如 Ag、Cu、Ni等)配置成低熔点合金作钎料(这种钎料熔融金属的表面张力和黏度小、润湿性好),加到被连接的陶瓷与金属的间隙中,在真空或 Ar 等惰性气氛炉内加热钎焊	陶瓷-金属连接	所连接的工件形状可任意,适合于产大量的场合。 Al_2O_3 与金属连接时,钎料可用 Ti-Cu、Ti-Ni、Ti-Ni-Cu、Ti-Ag-Cu、Ti-Au-Cu 等合金;要求高温强度的场合,钎料可用 Ti-V 系和 Ti-Zr 系添加 Ta、Cr、Mo、Nb 等的合金,钎焊温度 1300~1650 $^{\circ}\text{C}$

续表

分类	原 理	适用材料	说 明
陶瓷 熔接法	采用熔点比所连接的陶瓷和金属低的混合型氧化物玻璃质钎料,用有机粘接剂调成膏状,嵌入接头中,在氢气中加热熔接	陶瓷-金属连接	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO-SiO}_2$ 钎料用于陶瓷与耐热金属的连接,加热温度 1200°C 以上。 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MnO-SiO}_2$ 钎料用于陶瓷与铁系合金、耐热金属的连接,加热温度在 1400°C 以上
一氧化铜法	用一氧化铜(CuO)粉末(粒度 $2\sim 5\mu\text{m}$)作中间材料,在真空或氧化性气氛中加热,借熔融铜在 Al_2O_3 陶瓷面上的良好润湿性与氧化物反应进行钎焊	氧化物陶瓷(Al_2O_3 、 MgO 、 ZrO_2)之间的连接,氧化物与金属的连接	通常的钎焊条件是:在真空度 $6.67\times 10^{-5}\text{ Pa}$ 的真空炉中,约 500°C 下加热 20min
非晶合金法	用厚 $40\sim 50\mu\text{m}$ 、宽约 $10\mu\text{m}$ 的非晶二元合金(Ti-Cu 、 Ti-Ni 或 Zr-Cu 、 Zr-Ni)箔作钎料,置于结合面中,然后在真空或 Ar 气氛炉中加热钎焊	Si_3N_4 、 SiC 等陶瓷-陶瓷连接, Si_3N_4 或 SiC 与金属连接	活性金属化法的变种。用 Cu-Ti 合金箔作钎料连接 $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Si}_3\text{N}_4$ 或 SiC-SiC 等非氧化物陶瓷,可获得较高的接头强度
超声波 钎焊法	利用超声波振动的表面摩擦功能和搅拌作用,同时用 Sn-Pb 合金软钎料(通常添加 Zn 、 Sb 等)进行浸渍钎焊	玻璃、 Al_2O_3 陶瓷等的连接	纯度(质量分数)为 99.6% 的 Al_2O_3 难以用本法钎焊。纯度(质量分数)为 96% 的 Al_2O_3 用 Sn-Pb 钎料加 Zn 进行钎焊,可大大提高接头强度
激光活化 钎焊法	用氢氧化物系耐热玻璃作中间层置于接头中,在 Ar 或 N_2 气氛下边加热边用激光照射,使之活化,进行钎焊	玻璃、 Al_2O_3 陶瓷等的连接	—

① 陶瓷表面金属化法 主要适用于氧化物陶瓷。首先将陶瓷表面金属化,然后再与金属连接。金属化法的方法很多,最常用的是 Mo-Mn 法,主要是将纯金属粉末(Mo 、 Mn)与金属氧化物粉末组成的膏状混合物涂于陶瓷表面,再在炉中高温加热,形成金属层。也可在陶瓷表面电镀以形成金属层;采用 CVD 或 PVD 法进行气相沉积,也可在陶瓷表面形成金属层。

② 活性金属化法 适用于氧化物和非氧化物陶瓷。 Ti 、 Zr 、 Hf 等过渡金属的化学活性很强,被称为活性金属,它们对陶瓷有较强的亲和力。在 Au 、 Ag 、 Cu 、 Ni 等系统的钎料中加入这类活性金属后,形成所谓活性钎料。活性钎料在液态下极易与陶瓷发生化学反应而形成陶瓷与金属的连接。因为活性金属的化学活性性很强,所以钎焊一般要在真空中或极高纯度的惰性气氛中进行。

③ 氧化物钎料法 多用于电子产品的功能陶瓷与金属的连接。这种方法是利用氧化物熔化后形成的玻璃相,它一方面向陶瓷渗透,另一方面同时向金属浸润来形成连接。氧化物钎料分高温、低温两大类,高温氧化物钎料的软化温度高达 $1200\sim 2000^\circ\text{C}$,低温氧化物钎料的软化温度低于 $300\sim 400^\circ\text{C}$ 。陶瓷与金属连接时常用的是高温类氧化物钎料。

④ 氟化物钎焊法 利用卤族元素化合物作钎料进行一些非氧化物陶瓷的钎焊,可以获得具有较高抗拉强度而又耐热抗氧化的接头。这类钎料的主要成分是 CaF_2 和 NaF 等,钎焊时的加热温度都比较高。这种方法多应用于电子产品。

(3) 陶瓷钎焊用钎料

陶瓷金属化后再进行钎焊,使用最广泛的一种钎料是 BAg72Cu 。也可以根据需要,选用其他的钎料。陶瓷与金属连接常用的钎料见表 6.50。

表 6.50 陶瓷与金属连接常用的钎料

钎 料	成分/%	熔点/℃	熔点/℃
Cu	100	1083	1083
Ag	>99.99	960.5	960.5
Au-Ni	Au 82.5, Ni 17.5	950	950
Cu-Ge	Ge 12, Ni 0.25, Cu 余量	850	965
Ag-Cu-Pd	Ag 65, Cu 20, Pd 15	852	898
Au-Cu	Au 80, Cu 20	889	889
Ag-Cu	Ag 50, Cu 50	779	850
Ag-Cu-Pd	Ag 58, Cu 32, Pd 10	824	852
Au-Ag-Cu	Au 60, Ag 20, Cu 20	835	845
Ag-Cu	Ag 72, Cu 28	779	779
Ag-Cu-In	Ag 63, Cu 27, In 10	685	710

直接钎焊陶瓷的关键是使用活性钎料,在钎料能够润湿陶瓷的前提下,还要考虑高温钎焊时陶瓷与金属线胀系数差异引起的裂纹,以及夹具定位等问题。

用于直接钎焊陶瓷与金属的高温活性钎料见表 6.51。其中二元系钎料以 Ti-Cu、Ti-Ni 为主,这类钎料蒸气压较低,700℃时小于 1.33×10^{-3} Pa,可在 1200~1800℃ 范围使用。三元系钎料为 Ti-Cu-Be 或 Ti-V-Cr,其中 49Ti-49Cu-2Be 具有与不锈钢相近的耐腐蚀性,并且蒸气压较低,在防泄漏、防氧化的真空密封接头中使用。不含 Cr 的 Ti-Zr-Ta 系钎料,也可以直接钎焊 MgO 和 Al_2O_3 陶瓷,这种钎料获得的接头能够在温度高于 1000℃ 的条件下工作。国内研制的 Ag-Cu-Ti 系钎料,能够直接钎焊陶瓷与无氧铜,接头抗剪强度可达 70MPa。

表 6.51 用于直接钎焊陶瓷与金属的高温活性钎料

钎 料	熔化温度/℃	钎焊温度/℃	用途及接头性能
92Ti-8Cu	790	820~900	陶瓷-金属的连接
75Ti-25Cu	870	900~950	陶瓷-金属
72Ti-28Ni	942	1140	陶瓷-陶瓷、陶瓷-石墨、陶瓷-金属
68Ti-28Ag-4Be	—	1040	陶瓷-金属
54Ti-25Cr-21V	—	1550~1650	陶瓷-陶瓷、陶瓷-石墨、陶瓷-金属
50Ti-50Cu	960	980~1050	陶瓷-金属的连接
50Ti-50Cu (原子比)	1210~1310	1300~1500	陶瓷与蓝宝石、陶瓷与锆的连接
49Ti-49Cu-2Be	—	980	陶瓷-金属的连接
48Ti-48Zr-4Be	—	1050	陶瓷-金属
47.5Ti-47.5Zr-5Ta	—	1650~2100	陶瓷-钎
7Ti-93 (BAg72Cu)	779	820~850	陶瓷-钛的连接
6Ti-68Cu-26Ag	779	820~850	陶瓷-钛的连接
100Ge	937	1180	自粘接碳化硅-金属 ($\sigma_b=400$ MPa)
85Nb-15Ni	—	1500~1675	陶瓷-钎 ($\sigma_b=145$ MPa)
75Zr-19Nb-6Be	—	1050	陶瓷-金属
56Zr-28V-16Ti	—	1250	陶瓷-金属
83Ni-17Fe	—	1500~1675	陶瓷-钎 ($\sigma_b=140$ MPa)
66Ag-27Cu-7Ti	779	820~850	陶瓷-钛

由于陶瓷与金属连接多是在氢气炉或真空炉中进行, 当用陶瓷金属化法对真空电子器件钎焊时, 对钎料的要求如下。

① 钎料中不含有饱和蒸气压高的化学元素, 如 Zn、Cd、Mg 等, 以免在钎焊过程中这些化学元素污染电子器件或造成电介质漏电。

② 钎料的含氧量不能超过 0.001%, 以免在氢气中钎焊时生成水汽。

③ 钎焊接头要有良好的松弛性, 能最大限度地减小由陶瓷与金属线胀系数差异而引起的热应力。

在选择陶瓷与金属连接的钎料时, 为了最大限度地减小焊接应力, 有时也不得不选用一些塑性好、屈服强度低的钎料, 如纯 Ag、Au 或 Ag-Cu 共晶钎料等。

玻璃化法是利用毛细作用实现连接, 这种方法不加金属钎料而加无机钎料(玻璃体), 如氧化物、氟化物的钎料。氧化物钎料熔化后形成的玻璃相能向陶瓷渗透, 浸润金属表面, 最后形成连接。典型的玻璃化法氧化物钎料配方见表 6.52。

表 6.52 典型的玻璃化法氧化物钎料配方

系列	配方组成/%	熔制温度/℃	线胀系数/ $10^{-6}K^{-1}$
Al-Y-Si	Al_2O_3 15, Y_2O_3 65, SiO_2 20	—	7.6~8.2
Al-Ca-Mg-Ba	Al_2O_3 49, CaO 36, MgO 11, BaO 4	1550	—
	Al_2O_3 45, CaO 36.4, MgO 4.7, BaO 13.9	1410	8.8
Al-Ca-Ba-B	Al_2O_3 46, CaO 36, BaO 16, B_2O_3 2	(1320)	9.4~9.8
Al-Ca-Ba-Sr	Al_2O_3 44~50, CaO 35~40, BaO 12~16, SrO 1.5~5	1500 (1310)	7.7~9.1
	Al_2O_3 40, CaO 35, BaO 15, SrO 10	1500	9.5
Al-Ca-Ta-Y	Al_2O_3 45, CaO 49, Ta_2O_5 3, Y_2O_3 3	(1380)	7.5~8.5
Al-Ca-Mg-Ba-Y	Al_2O_3 40~50, CaO 30~40, MgO 10~20,	1480~1560	6.7~7.6
	BaO 3~8, Y_2O_3 0.5~5		
Zn-B-Si-Al-Li	ZnO 29~57, B_2O_3 19~56, SiO_2 4~26, Li_2O 3~5,	(1000)	4.9
Si-Ba-Al-Li-Co-P	Al_2O_3 0~6		
	SiO_2 55~65, BaO 25~32, Al_2O_3 0~5, Li_2O 6~11, CaO	(950~1100)	10.4
	0.5~1, P_2O_5 1.5~3.5		
Si-Al-K-Na-Ba-Sr-Ca	SiO_2 43~68, Al_2O_3 3~6, K_2O 8~9, Na_2O 5~6, BaO	(1000)	8.5~9.3
	2~4, SrO 5~7, CaO 2~4, 另含少量 Li_2O 、MgO、		
	TiO_2 、 B_2O_3		

注: 括号中的数据为参考温度。

玻璃体固化后没有韧性, 无法承受陶瓷的收缩, 只能靠配制成分使其线胀系数尽量与陶瓷的线胀系数接近。这种方法的实际应用也是相当严格的。

调整钎料配方可以获得不同熔点和线胀系数的钎料, 以便适用于不同的陶瓷和金属的连接。这种玻璃体中间材料实际上是 Si_3N_4 陶瓷晶粒间的黏结相(如 Al_2O_3 、 Y_2O_3 、MgO 等)以及杂质 SiO_2 , 是烧制时就有的。连接在超过 1530℃ 的高温下(相当于 Y-Si-Al-O-N 的共晶点)进行, 不需加压, 通常用氮气保护。

(4) 钎接头设计注意事项

① 合理选择钎接匹配材料 选择线胀系数相近的陶瓷与金属相互匹配, 如 Ti 与镁橄榄石陶瓷和 Ni 与 95% Al_2O_3 陶瓷, 在室温至 800℃ 范围内, 线胀系数基本一致。利用金属的塑性减小钎接应力, 如用无氧铜与 95% Al_2O_3 陶瓷钎接, 虽然金属与陶瓷的线胀系数差别很大, 但由于充分利用了软金属的塑性与延展性, 仍能获得良好的连接。

选择高强度、高热导率的陶瓷, 如 BeO、AlN 等, 可以减小钎接头处的热应力, 提

高钎缝结合强度。

② 利用金属件的弹性变形减小应力 利用金属零件的非钎接部位薄壁弹性变形, 设计成“挠性钎接结构”以释放应力。典型的挠性钎接头形式见图 6.7。

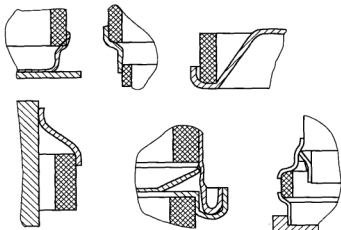


图 6.7 典型的挠性钎接头形式

③ 避免应力集中 陶瓷件设计应避免尖角或厚薄相差悬殊, 尽量采用圆形或圆弧过渡。套封时改变金属件端部形状, 使封口处金属端减薄, 可增加塑性, 减小应力集中。

控制钎焊件加热温度, 防止产生焊瘤。钎料的线胀系数一般都比较大, 如果钎料堆积, 会造成局部应力集中, 导致陶瓷炸裂。

④ 重视钎料的影响 尽量选用强度低、塑性好的钎料, 如 Ag-Cu 共晶, 纯 Ag、Cu、Au 等, 以最大限度地释放应力。在保证密封的前提下, 钎料层尽可能薄。选择适宜的焊脚长度, 套封时焊脚长度对接头强度影响很大, 一般以 0.3~0.6mm 为宜。

(5) 陶瓷金属化钎焊工艺

以 Mo-Mn 金属化法为例, 陶瓷金属化钎焊连接的工艺流程见图 6.8。



图 6.8 Mo-Mn 法陶瓷金属化钎焊连接的工艺流程

金属化膏剂的制备和涂覆工艺如下。

① 零件的清洗 陶瓷件可以在超声波清洗机中用清洗剂清洗, 然后用去离子水清洗并烘干。金属件则要通过碱洗、酸洗的办法去除金属表面的油污、氧化膜等, 并用流动水清洗、烘干。清洗过的零件应立即进入下一道工序, 中间不得用裸手接触。

② 涂膏剂 将各种原料的粉末按比例称好, 加入适量的硝棉溶液、醋酸丁酯、草酸二乙酯等。这是陶瓷金属化的重要工序, 膏剂多由纯金属粉末加适量的金属氧化物组成, 粉末粒度在 $1\sim 5\mu\text{m}$ 之间, 用有机黏结剂调成糊状, 用毛笔或其他一些喷涂的方法均匀地涂刷在需要金属化的陶瓷表面上。涂层厚度为 $30\sim 60\mu\text{m}$ 。

- ③ 陶瓷金属化 将涂好的陶瓷件放入氢气炉中,在 1300~1500℃ 温度下保温 0.5~1h。
- ④ 电镀 金属化层多为 Mo-Mn 层,难与钎料浸润,须再镀上一层厚度 4~5μm 的镍。
- ⑤ 装架 将处理好的金属件和陶瓷件装配在一起,在接缝处装上钎料。
- ⑥ 钎焊 在氢气炉或真空炉中进行,钎焊温度由钎料而定。在钎焊过程中加热和冷却速度都不能过快,以防止陶瓷件炸裂。
- ⑦ 检验 对一些特殊要求的陶瓷封接件,如真空器件或电器件,要进行泄漏、热冲击、热烘烤和绝缘强度等检验。

(6) 活性金属化法钎焊工艺

过渡族金属(如 Ti、Zr、Nb 等)具有很强的化学活性,这些元素对氧化物、硅酸盐等有较强的亲和力,可通过化学反应在陶瓷表面形成反应层。在 Au、Ag、Cu、Ni 等系统的钎料中加入这类活性金属后,形成所谓活性钎料。活性钎料在液态下极易与陶瓷发生化学反应而形成陶瓷与金属的连接。

反应层主要由金属与陶瓷的复合物组成(表现出与金属相同的微观结构,可被熔化金属润湿),达到与金属连接的目的。活性金属的化学活性很强,钎焊时活性元素的保护是很重要的,这些元素一旦被氧化后就不能再与陶瓷发生反应。因此活性金属化法钎焊一般是在 10^{-2} Pa 以上的真空或惰性保护气氛中进行,一次完成钎焊连接。

活性金属化法钎焊用活性钎料通常以 Ti 作为活性元素。可适用于钎焊氧化物陶瓷、非氧化物陶瓷以及各种无机介质材料。由于是用活性金属与陶瓷直接钎接,工序简单,所以发展很快。表 6.53 是几种常用的活性金属化法钎焊的比较。

表 6.53 几种常用的活性金属化法钎焊的比较

钎料	钎料加入方式	钎焊温度 /℃	保温时间 /min	陶瓷材料	金属材料	特点及应用
Ag-Cu-Ti	在陶瓷表面预涂厚度为 20~40μm 的 Ti 粉,然后用厚度为 0.2mm 的 Ag69Cu26Ti5 钎料施焊	850~880	3~5	高氧化铝、蓝宝石、透明氧化铝、镁橄榄石、微晶玻璃、云母、石墨以及非氧化物陶瓷	Cu、Ti、Nb	对陶瓷润湿性良好,接头气密性好,应用广泛。常用于大件匹配性钎接和软金属与高强度陶瓷钎接。缺点是钎料含 Ag 量大,蒸汽压高易沉积陶瓷表面,使绝缘性能下降
Ti-Ni	用厚度为 10~20μm 的 Ti71.5Ni28.5 箔作钎料施焊	990±10	3~5	高氧化铝、镁橄榄石陶瓷	Ti	钎焊温度较高,蒸汽压较低,对陶瓷润湿性良好,特别适用于 Ti 与镁橄榄石陶瓷的匹配钎接。缺点是钎焊温度范围窄,零件表面清理严格
Cu-Ti	Ti 25%~30%,Cu 余量,用符合上述匹配的 Ti(Cu)箔或粉做钎料施焊	900~1000	2~5	高氧化铝镁橄榄石以及非氧化物陶瓷	Cu、Ti、Ta、Nb、Ni-Cu	钎焊温度较高,蒸汽压低,对陶瓷润湿性良好,合金脆硬,适用于匹配钎接或高强度陶瓷钎接

以活性金属 Ti-Ag-Cu 法为例,陶瓷与金属的活性钎焊连接的工艺流程见图 6.9。

活性金属化法钎焊工艺要点如下。

① 零件清洗 陶瓷件可在超声波清洗机中清洗,金属件通过碱洗、酸洗去除金属表面的油污、氧化膜等。清洗过的零件立即进入下一道工序。

② 制膏剂 制膏所用的钛粉纯度应在 99.7% 以上,粒度在 270~360 目范围。制膏剂时取重量为钛粉之半的硝棉溶液,加上少量的草酸二乙酯稀释,调成膏状。

③ 涂膏剂 用毛笔或其他喷涂的方法将活性钎料膏剂均匀地涂覆在陶瓷的钎接面上。

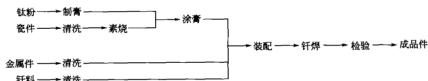


图 6.9 陶瓷与金属的活性钎焊连接工艺流程

涂层要均匀，厚度一般在 $25\sim 40\mu\text{m}$ 。

④ 装配 陶瓷表面的膏剂晾干后与金属件及 BAg72Cu 钎料装配在一起。

⑤ 钎接 在真空或惰性气氛中进行钎接连接。当真空度达到 $5\times 10^{-3}\text{Pa}$ 时，逐渐升温到 779°C 使钎料熔化，然后再升温至 $820\sim 840^{\circ}\text{C}$ ，保温 $3\sim 5\text{min}$ 后（温度过高或保温时间过长都会使得活性元素与陶瓷件反应强烈，引起钎缝组织疏松，形成漏气）降温冷却。在加热或冷却过程中，注意加热、冷却速度，以避免因加热、冷却过快而造成陶瓷开裂。

⑥ 检验 对钎接件要进行耐烘烤性能检验和气密性检验。对真空器件或电器件，要进行漏气、热冲击、热烘烤和电绝缘强度等检验。

6.4.2 硬质合金与钢的钎焊

(1) 硬质合金与钢的钎焊方法及特点

硬质合金与钢的钎焊方法主要有：氧-乙炔火焰钎焊、高频感应钎焊、接触电阻钎焊、浸铜钎焊、加热炉中钎焊和真空钎焊等。

① 常用的钎焊方法

a. 氧-乙炔火焰钎焊 氧-乙炔火焰钎焊是最常用的钎焊方法之一。硬质合金钎焊可用一般的氧-乙炔气焊设备，不需要增加其他的专用设备。根据氧-乙炔火焰的特点，采用合理的加热方式和选用正确的工艺，能焊出优质的硬质合金工具。

氧-乙炔火焰的焰心温度高达 3000°C 左右，在钎焊加热时应避免用焰心直接喷射硬质合金，以免温度过高产生裂纹。钎焊前先将钎剂、钎料和硬质合金依次放好，用还原火焰在靠近硬质合金的底部基体部分进行预热。当预热温度达到 $700\sim 800^{\circ}\text{C}$ 钎剂开始熔化时，再从上面加热硬质合金片及周围的焊缝，直到钎料熔化呈晶亮的液态，并沿侧面焊缝渗入表面。此时应抬高火焰，使焰尾继续沿焊缝四周加热，以保持钎焊温度。同时用金属棒拨动刀片沿刀槽往复移动 $2\sim 3$ 次，调整并压紧刀片，把多余的钎料及熔渣排出。排渣后，即停止加热并用加压棒在硬质合金顶面的中心部分加压，停留 $2\sim 3\text{s}$ ，待钎料凝固后，即可送入保温箱或保温介质中保温 $2\sim 3\text{h}$ ，使之缓慢冷却。缓冷后的硬质合金刀具，如再经过消除应力的回火处理，能收到更好的效果。回火温度约 300°C ，保温 6h 后随炉冷至室温。

氧-乙炔火焰钎焊适用于批量比较小的中小型硬质合金刀具、模具和量具，也适于野外修复损坏的硬质合金采掘工具。

b. 高频感应钎焊 高频感应钎焊是利用频率为 600kHz 、功率在 $10\sim 100\text{kW}$ 之间的高频感应加热电源，产生高频电流。当高频电流穿过感应器时产生高频交变磁场，在感应器中的被焊金属中产生感应电流。高频加热速度很快，可以在很短时间内加热到很高的温度，使钎料熔化。

高频感应钎焊使用的感应器大多是用直径 $5\sim 10\text{mm}$ 的紫铜管绕制而成。感应器的几何形状和尺寸选择是否合适，是决定高频感应钎焊的加热速度、温度均匀性、生产效率及钎焊质量的重要因素。

在焊接前，应根据被焊刀具的大小调节高频感应设备的输出功率，使工件加热速度适

中,温度均匀。功率过大,使工件局部过热和钎料熔化不完全,易使硬质合金产生裂纹;功率太小,则加热时间过长,容易造成刀体氧化,影响生产效率。一般焊接加热速度为 $30\sim 60^{\circ}\text{C}/\text{s}$,钨钼钎合金的加热速度应为 $10\sim 40^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。

高频感应钎焊加热速度快,钎焊效率高,操作简单,劳动条件比较好,适用于大批量的自动或半自动钎焊。但是设备投资大,耗电量。

c. 接触钎焊 接触钎焊是在专门用于钎焊硬质合金刀具的钎焊机或对焊机上进行,焊接变压器的次级线圈电压小于 36V ,电流在 1000A 以上。钎焊时将工件夹在两个紫铜电极之间,当次级线圈输出的强大电流通过焊接工件时,利用硬质合金和钢基体之间的接触电阻产生的热量作为焊接热源使钎料熔化。

接触钎焊常用于钎焊硬质合金车刀、刨刀等工具。接触钎焊的焊接效率高,大截面的硬质合金车刀、刨刀只需 $4\sim 5\text{min}$ 即可焊一把。在加热过程中断电 $1\sim 2$ 次,直至晶亮的液态钎料布满整个钎缝。由于加热时间短,氧化和热变形小,并且操作方便。但是加热过程中电极容易烧伤工件表面,有时也会因电极或硬质合金表面未清理干净,或接触面的电阻过大而无法导电加热。

d. 浸铜钎焊 浸铜钎焊是将被焊工件的钎焊部分浸入熔化的液态钎料中,利用毛细作用使液态钎料沿工件的钎缝渗入,从而达到钎焊的目的。浸铜钎焊通常以盐浴炉、焦炭炉或油炉作热源,钎料和钎剂都置于石墨或耐热不锈钢坩埚中加热至液态。这种钎焊方法适用于成批生产各种硬质合金刀具和钻探用的硬质合金钻头等。可以一次加热完成多刃硬质合金刀具的钎焊,有较高的钎焊效率。

采用浸铜钎焊的硬质合金多刃刀具要求刀片槽有高度 $0.3\sim 0.4\text{mm}$ 的夹持刀片用的工艺墙,并且刀片与刀片槽配合要好。装配前用四氯化碳仔细清洗刀片和刀槽,用尖片将刀片铆紧,然后在刀具离钎缝 2mm 外的非焊接面上涂上厚度为 $1\sim 3\text{mm}$ 的保护涂料层。待阴干后,放入 $250\sim 300^{\circ}\text{C}$ 的烘箱内烘烤 30min ,即可进行钎焊。

② 常用的保护涂料 硬质合金钎焊中常用的保护涂料有以下几种。

a. 印刷用的黑色油墨和 240 号粒度的石英粉,按 $1:2$ 的比例混合均匀,调成糊状,即可使用。

b. 用 Al_2O_3 粉 20% 、石墨粉 80% 混合均匀后,再与 50% 的水和 50% 的水玻璃液体调配而成,氧化铝越多,涂层的强度越高。

③ 钎焊中应采取的工艺措施 当浸铜钎焊的坩埚升温至 $450\sim 550^{\circ}\text{C}$ 时开始放入硼砂,加热至 $750\sim 780^{\circ}\text{C}$ 时加入钎料。在加热过程中,硼砂首先熔化,然后是钎料。当钎料熔化后,硼砂浮在钎料上。硼砂既可以防止钎料氧化,又避免了钎料中的金属挥发,并使温度均匀。

钎焊前可以用铁丝检查钎料的温度是否适中。将铁丝插入铜液中再抽出来,若铁丝上均匀地粘上一层薄铜,即表明钎料的温度合适,可以进行焊接;如果铁丝上粘的铜太多太厚,表明钎料温度过低;如果铁丝上粘的铜太少,并且铁丝取出后铜液不断地往下滴,表明钎料的温度过高。

浸铜钎焊前要对工件先进行预热,预热温度为 $400\sim 500^{\circ}\text{C}$,然后再放入硼砂溶液中进行第二次预热,当温度达到 700°C 时,即可沉入铜液中浸焊。浸焊的时间随刀具形状和尺寸大小不同而异,按截面最小的尺寸计算,每毫米需 12s 。为了防止工件表面的涂料脱落,在铜液中浸焊时,不能来回摆动工件。浸焊到规定的时间后,应缓缓提起工件,防止焊料因来不及凝固而流失。焊接好后,应对工件进行保温缓冷,以减小应力。一些基体需要淬硬的工件,可在加热钎焊的同时进行淬火处理。

(2) 硬质合金用钎料与钎剂

① 钎料选择 对硬质合金钎料的主要要求如下。

a. 钎料应对被钎焊的硬质合金和钢基体有良好的润湿性, 保证钎料具有良好的流动性与渗透性。

b. 硬质合金的使用特点之一是有较高的热硬性, 所以要保证钎焊焊缝在常温 and 高温下有足够高的强度。

c. 钎料的熔点要尽可能地低, 以减小钎焊应力, 防止产生裂纹, 但钎料的熔点要高于钎缝的工作温度 300℃, 以保证刀具在高速切削时能正常工作。

d. 钎料中不应含有低挥发点的元素, 以免在钎焊加热时因钎料中的元素蒸发而影响接头质量或有害于人体健康。

硬质合金与钢的钎焊通常用铜基及银基钎料, 常用钎料及配用的钎剂见表 6.54。

表 6.54 硬质合金与钢钎焊时用的钎料和钎剂

钎 料		钎剂及其配方(质量分数)/%
型号	熔化温度/℃	
B-Cu62Zn	900~905	200 (前苏联): 硼酐 65, 硼砂 19, 氟化钙 15 YJ-6, 硼酸 80, 硼砂 14.5, 氟化钙 5.5
B-Cu60ZnMn	890~905	
801	890~911	
B-Cu47ZnMnNiCo (841)	855~865	QJ102: 脱水氟化钾 42, 氟硼酸钾 23, 硼酐 35
B-Ag45CuZn (HL303)	660~725	
B-Ag50ZnCuCdNi (HL315)	632~688	

硬质合金与钢钎焊的钎料根据其熔点和钎焊温度分为高温钎料、中温钎料和低温钎料三大类。钎焊温度在 1000℃ 以上的钎料称为高温钎料, 如紫铜和 106 钎料等; 中温钎料的钎焊温度在 850~1000℃ 之间, 如 H62、H68 黄铜钎料等; 低温钎料是指钎焊温度在 650~850℃ 之间, 如 B-Ag-1 和 L-Ag-49 等含银钎料。表 6.55 所示是常见的硬质合金与钢钎焊用钎料的成分、性能及使用范围。

表 6.55 硬质合金与钢钎焊用钎料的成分、性能及使用范围

钎料名称	化学成分/%									熔点/℃	使用范围
	Cu	Fe	Ni	Mn	Si	Al	Zn	Sn	Ag		
铜铁镍合金	72	12	10	4.2	1.8	—	—	—	—	1200	适于大负荷及切削刃 温度在 900℃ 以下的切削 加工
铜镍合金	70	—	30	—	—	—	—	—	—	1220	
铜锌镍合金(白铜)	68.7	—	27.5	—	—	0.3	3.0	—	—	1170	
电解铜	99.9	—	—	—	—	—	—	—	—	1083	适于大负荷及切削刃 温度在 700℃ 以下的切削 加工
含磷黄铜	68	—	5	—	—	—	27	—	—	1000	
H68 黄铜	68	—	—	—	—	—	32	—	—	950	适于中负荷切削加工, 工作温度在 600℃ 以下者
锰黄铜	60	1.2	—	1.2	—	—	37.6	—	—	920	
105 焊料	58	—	—	4	—	—	38	—	—	909	
H62 黄铜	62	—	—	—	—	—	38	—	—	900	
银基焊料	30	—	—	—	—	—	24.7	0.3	45	820	适于钎焊低钴和高钒 合金, 如 YG3、YG2、YG3X 及 YT30 等
106 焊料	—	—	—	20	—	—	—	—	80	970	
107 焊料	58	—	—	4	—	—	38	—	—	909	
B-Ag-1	18	—	5	8	—	—	20	—	49	700	
L-Ag-49	15	—	—	—	—	—	16	—	45	615	

注: L-Ag-49 钎料还含有 24% Cd。

紫铜钎料的钎焊温度高而焊缝强度低,多用于真空钎焊。纯铜钎料属单相组织,比较容易控制钎焊温度,对各类硬质合金都有良好的润湿性,塑性好、价格最便宜。紫铜钎焊焊缝的剪切应力在 150MPa 左右,可在 400℃ 以下使用。

H68 黄铜的钎焊温度比紫铜低得多,但因焊缝强度过低,不经常使用。H62 黄铜的熔点和钎焊温度比较低,焊缝具有一定的室温强度,是比较常用的硬质合金钎料。一般用于钎焊在中、小负荷条件下使用的硬质合金工具。需要高温强度的焊缝或焊接面较小的情况下,应采用 105 钎料。

L-Ag-49 低温银钎料在国外使用比较普遍,因为它的熔点较低 (690~710℃),对硬质合金有较好的润湿性,有钎焊方便和钎焊应力小等优点。必要时还可以使用紫铜片作补偿垫片,几乎可以完全消除钎焊应力,避免钎焊裂纹。钎焊一些易裂的硬质合金或一些大钎焊面的硬质合金工具,可以采用 L-Ag-49 低温银钎料。

由于用 L-Ag-49 银钎料钎焊的工件随着使用温度的提高,焊缝强度迅速下降,所以用 L-Ag-49 钎料的工件工作温度应限制在 200℃ 以下。与 L-Ag-49 银钎料配合使用的钎剂中含有较多的氟化物和氯化物,对焊后清理要求较高,否则会因清洗不干净而导致工件表面腐蚀。

B-Ag-1 钎料是一种超低温银钎料,熔点在 600~610℃,能使硬质合金接头区的应力进一步降低,也可用紫铜片作补偿垫片来钎焊一些易裂的工件。由于 B-Ag-1 银钎料的超低熔点以及对碳化钨有良好的润湿性,也适用于金刚石大锯片等某些金刚石工具的钎焊。但 B-Ag-1 银钎料的价格高,高温强度低,只适宜在低于 150℃ 的温度下使用。该钎料中镉含量为 24%,钎焊温度比较高时容易蒸发,有害于人体健康。在钎焊时除了必须控制钎焊温度外,还应在钎焊操作处安装排气装置。钎焊后也应注意将工件上的钎剂残渣清洗干净,以免工件腐蚀。

② 钎剂的选择 钎剂的作用是使刀杆和硬质合金钎焊表面的氧化物还原,使钎料能很好地润湿被钎焊的金属表面。一般钎剂的熔点要低于钎料熔点 100℃ 以上,并有较好的流动性和较低的黏度。钎焊加热过程中熔化了钎剂能保护钎料和钎焊面,同时起到对氧化物的还原作用。表 6.56 是常用的硬质合金与钢钎焊用钎剂的化学成分和适用范围。

表 6.56 常用的硬质合金与钢钎焊用钎剂的化学成分和适用范围

$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	B_2O_3	$\text{H}_2\text{B}_4\text{O}_7$	KF	LiCl_2	NaF/CaF_2	适用范围
100	—	—	—	—	—	适用于熔点在 850℃ 以上的硬钎料钎焊
70	—	30	—	—	—	适用于熔点在 1000℃ 以下的焊料钎焊
85	—	—	15	—	—	适用于高碳化钛类硬质合金钎焊
80	20	—	—	—	—	适用于熔点在 1000℃ 以上的焊料钎焊
55	15	—	20	—	10	适用于高碳化钛类硬质合金钎焊
60	30	—	—	—	10	适用于钨钴和钨钛钴类硬质合金钎焊
70	—	10	20	—	—	适用于钨钛钴类硬质合金钎焊
50	—	35	15	—	—	适用于低温银钎料
—	70	—	—	30	—	适用于低温银钎料

硼砂是硬质合金与钢钎焊时最常用的钎剂,使用中应注意各种硼砂的适用范围。

a. 工业硼砂 (生硼砂): 在使用前应先进行脱水处理,因为工业硼砂内含有 10 份结晶水 ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$),再加上它在空气中吸收了大量水分,在钎焊加热过程中会产生大

量泡沫,不但使钎焊操作困难,而且也影响焊缝的质量,最好不采用。

b. 脱水硼砂 ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$): 可用于钎焊各种牌号的硬质合金工件, 钎焊温度范围从 850~1150℃, 适合作为紫铜、黄铜、Cu-Zn 钎料、银钎料等的钎焊熔剂, 但不适于熔点低于 800℃ 的钎料钎焊。脱水硼砂存放时必须注意防潮, 若受潮应烘干后再使用。

硼砂的脱水处理是将工业硼砂盛在钢制坩埚内, 将坩埚放入 850℃ 的电阻炉或焦炭炉内加热, 加热过程中坩埚内的硼砂冒出大量的白色泡沫。随着加热温度的升高, 泡沫逐渐减少, 直至泡沫消失。等硼砂全部熔化成液体时即可停止加热, 将坩埚内绿色透明的液态硼砂倒在铁盒内, 冷却后即自动裂碎成绿色玻璃状碎块。脱水后的硼砂颜色与熔炼时间长短有关, 熔炼时间越长, 硼砂的颜色越深, 但对钎焊的质量没有影响。将熔炼后的硼砂块捣碎, 用 60~80 目筛子过筛后装入瓶内待用。

c. 脱水硼砂 (85~90)%+氟化钾 (10~15)% 的混合熔剂: 主要用于 YT60、YT30 等牌号硬质合金的钎焊。因氟化钾有毒性, 钎焊时在加热设备附近必须装有强力通风设备, 及时将有害气体排出。

氟化物和氯化物有较强的吸水性, 在配制含有氟化物和氯化物的熔剂时, 也应对其进行脱水处理。脱水时将氟化物和氯化物放在陶瓷或不锈钢的坩埚中加热至 270℃ 左右, 保温 3~4h, 直到不冒烟为止。脱水后的氟化物和氯化物应储存在密闭的玻璃容器内。使用含氟化物或氯化物的熔剂时应注意通风, 及时排除有害气体。钎焊后应及时清洗焊件, 以免残余的熔剂腐蚀焊缝和基体金属。

大多数钎剂都容易吸潮, 要注意密封保存, 做到随用随取。也可以将钎剂预先调制成糊状, 糊状熔剂是将配制好的钎剂加少量酒精、松香油、凡士林油等调成糊状, 涂抹在待焊的工件表面。使用低温银钎料时, 也可用水将钎剂调成糊状使用, 糊状钎剂应现配现用。

(3) 硬质合金与钢的钎焊工艺

① 焊前准备

a. 焊前应首先检查硬质合金是否有裂纹、弯曲或凹凸不平或缺陷。钎焊面必须平整, 如果是球形或矩形的硬质合金, 钎焊面也应符合一定的几何形状, 保证合金与基体之间有良好的接触, 才能保证钎焊质量。

b. 对硬质合金进行喷砂处理, 没有喷砂设备的情况下, 可用手拿住硬质合金, 在旋转着的绿色碳化硅砂轮上磨去钎焊面上的氧化层和黑色牌号字母。如不除去硬质合金钎焊面上的氧化层, 钎料不易润湿硬质合金。经验证明, 钎焊面上若有氧化层或黑色牌号字母, 应进行喷砂处理, 否则钎料不易润湿硬质合金, 钎缝中仍会出现明显的黑色字母, 使钎焊面积减少, 发生脱焊现象。

c. 在清理硬质合金钎焊面时, 最好不用化学机械研磨或电解磨削等方法处理, 因为它们都是靠腐蚀硬质合金表面层的黏结剂来加快研磨或提高磨削效率的, 而硬质合金表面的钴被腐蚀掉后, 钎料就很难再润湿硬质合金, 容易造成脱焊。特殊情况下, 硬质合金钎焊面必须用上述方法或电火花线切割处理时, 可将处理后的硬质合金再进行喷砂处理或用碳化硅砂轮磨去表面层。喷砂后的硬质合金可用汽油、酒精清洗, 以去除油污。

d. 钎焊前应仔细检查钢基体上的槽形是否合理, 尤其是对易裂牌号的硬质合金和大钎焊面的硬质合金工件, 更应严格检查。刀槽也应进行喷砂处理和清洗去除油污。清洗量大时, 可采用碱性溶液煮沸 10~45min。用高频或浸铜钎焊的多刃刀具及复杂量具, 最好用饱和硼砂水溶液煮沸 20~30min, 取出烘干后再进行焊接。

e. 钎料使用前用酒精或汽油擦净, 并根据钎焊面裁剪成形。钎焊一般硬质合金刀具或模具时, 钎料厚度为 0.4~0.5mm 比较合适, 大小与钎焊面相似即可。当用焦炭炉加热时,

钎料可适当增加。在钎焊硬质合金多刃刀具、量具等工件时,应尽量缩小钎焊片的面积,一般可将钎料片剪成钎焊面的1/2左右,当钎焊技术熟练时,可将钎料片减少至钎焊面的1/3或更小。减少钎料可使焊后工件外形美观、刃磨更方便。

② 钎焊过程 硬质合金工具的钎焊工艺是否正确对焊接质量有至关重要的影响。加热速度对钎焊接头质量有明显的影响。快速加热会使硬质合金片产生裂纹和温度不均;但加热过慢,又会引起表面氧化,使接头强度降低。表6.57是部分硬质合金容许的加热速度。

表6.57 不同牌号硬质合金焊接时容许的加热速度

硬质合金片长度/mm	YG8	YT5	YT15	YT30
	钎焊时允许的加热速度/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$			
20以下	80~100	60~80	50~60	30~40
20~40	20~30	15~20	12~15	10~12

钎焊硬质合金工具时,均匀加热刀杆和硬质合金片是保证接头质量的基本条件。如果硬质合金片加热温度高于刀杆,熔化后的钎料润湿了硬质合金片而不能润湿刀杆,这时接头强度就会降低,在沿焊缝剪切合金片时,钎料不破坏,而随合金片脱开。在焊层上还可看到刀杆支撑面铣刀痕迹。如加热速度过快,刀杆温度高于硬质合金片时,会出现相反的现象。

钎剂、钎料和硬质合金安放顺序和相互位置对钎焊质量有直接的影响。正确地安放钎剂、钎料和硬质合金的方法是:将钎料放在刀槽上,撒上钎剂,再放硬质合金,在硬质合金顶面沿侧面焊缝处再撒上一层钎剂。这样在钎焊时便于掌握钎焊温度,减少焊缝外黏附的多余钎料。

硬质合金与钢氧-乙炔火焰钎焊的操作技术要点如下。

- 为了防止硬质合金刀片在钎焊过程中脱碳或过烧,要选用碳化焰。
- 钎焊温度以 1000°C 左右为宜,从实际经验看,即硬质合金刀片加热呈亮红色。如果刀片呈暗红色或白亮色时不能钎焊,因为前者温度过低,后者温度过高,已出现过烧现象。
- 焊炬由左向右、由右向左、由上向下反复对刀体进行加热,使刀体和刀片受热均匀一致。
- 钎焊时焊嘴与刀杆的间距约为50mm,焊嘴与刀杆端倾斜角度为 110° ,这样可有效地利用火焰热量和加热平衡。钎焊过程中,要使火焰始终覆盖在整个钎焊部位,使之与空气隔离,以防止氧化或产生气孔。
- 钎焊速度应按刀片的大小来确定。钎焊40钢与YT15硬质合金的车刀应尽量在1min内完成,这样能有效地防止硬质合金过烧或脱碳。
- 钎焊之后,需用火焰对刀片部位进行加热,然后慢慢地将焊嘴离开,使焊件缓慢冷却,以防止裂纹。

钎焊过程中,要正确地控制工件的钎焊温度。钎焊温度过高,会造成钎缝氧化和含钎钎料中锌元素的蒸发;钎焊温度过低,钎缝会因钎料的流动性不好而偏厚,钎缝内有大量的气孔和夹渣,这是造成脱焊的主要原因。钎焊温度应比钎料熔点高 $30\sim 50^{\circ}\text{C}$,这时钎料的流动性、渗透性好,易于渗透布满整个钎缝。钎料熔化后用紫铜加压器将硬质合金沿槽窝往复移动2~3次,以排除钎缝中的熔渣。移动距离为硬质合金长度的 $1/3\sim 1/5$ 。

钎焊后的冷却速度是影响钎焊裂纹的主要因素之一。冷却时硬质合金片表面产生瞬时拉应力,硬质合金的抗拉应力大大低于其抗压应力,尤其是YT60、YT30、YG3X等硬质合金、钎焊面积较大和基体小而硬质合金较大的工件,更应注意钎焊后的冷却速度。通常是将焊后工件立即插入石灰槽或木炭粉槽中,使工件缓慢冷却。这种方法操作简单,但是无法控

制回火温度。有条件的可在钎焊后立即将工件放入 $220\sim 250^{\circ}\text{C}$ 的炉内回火 $6\sim 8\text{h}$ 。采用低温回火处理能消除部分钎焊应力、减少裂纹和延长硬质合金工具的使用寿命。

③ 焊后清理 要对焊好的硬质合金工件进行焊后清理,以便将钎缝周围的熔剂残渣清除干净,否则在刀具刃磨时多余的熔剂残渣会将砂轮堵塞,使磨削困难。焊后的熔剂残渣也会腐蚀钎缝和基体。常用的清除方法如下。

a. 将焊后已冷却的工件放入沸水中煮 $1\sim 2\text{h}$,然后再进行喷砂处理,即可清除钎缝四周黏附的残余钎剂及氧化物等。

b. 将工件放入酸洗槽中进行酸洗(盐酸与水浓度为 $1:1$),酸洗时间为 $1\sim 4\text{min}$,然后放入冷水槽和热水槽中反复清洗干净。

④ 钎焊质量检验 主要检查硬质合金与钢钎焊接头质量以及硬质合金有无裂纹存在。正常的钎缝应均匀、无黑斑,钎料未填满的钎缝不大于钎缝总长度的 10% ,钎缝宽度应小于 0.15mm 。刀片钎焊歪斜,不符合图纸要求者应重焊。

硬质合金刀片的裂纹倾向可用下列方法检查。

a. 刀具经喷砂清理后,先用煤油清洗,然后用肉眼或放大镜观察。当刀片上有裂纹时,表面上会出现明显的黑线。

b. 用 65% 的煤油、 30% 的变压器油及 5% 的松节油调成溶液,加入少量苏丹红,将刀具放入该溶液中浸泡 $10\sim 15\text{min}$,取出用清水洗净,涂上一层高岭土,烘干后检查表面。如刀具有微裂纹,溶液的颜色便在白土上显示出来,用肉眼可明显地看到。

(4) 硬质合金钎焊接头的缺陷及防止

① 硬质合金钎焊裂纹产生的原因 导致硬质合金钎焊工件上产生裂纹的因素是多方面的,如槽形设计、钎焊工艺、加热过程及冷却条件等。

a. 一些硬度高、强度低的硬质合金,如 YT60、YT30、YG2 和 YG3X 等,容易产生钎焊裂纹,尤其是这些牌号的硬质合金的钎焊面积比较大时更应当引起重视。

b. 封闭式或半封闭式的情形,是增加钎焊应力、促使造成裂纹的重要原因。应在满足钎缝强度使用要求的情况下,尽可能采用自由开口式槽形,减少钎焊面积,以减小钎焊应力。

c. 焊接加热速度太快或焊后冷却速度过快会造成热量分布不均,产生较大应力、引起裂纹。快速加热时,硬质合金外层受压应力,中间受拉应力,超过允许的加热速度时,可能产生可见的裂纹和内部裂纹。钎焊后快速冷却时,外层上会出现拉应力,而引起合金中出现裂纹。应避免将工件放在潮湿的地面上或放在潮湿的石灰槽中,这会使硬质合金因剧冷而产生裂纹。

d. 硬质合金本身有缺陷,在焊前检查时未能发现而导致钎焊后产生裂纹。对于大面积或特殊形状的硬质合金,钎焊前必须逐块进行严格检查。硬质合金在烧结过程中的缺陷,如小裂纹、崩角、疏松等,加热和钎焊后可能扩大而形成大裂纹。

e. 钎焊后刃磨不当也会产生裂纹,如砂轮的材料、硬度和粒度等选用不合适,磨削时用水冷却、磨削余量留得过大、磨削工艺不当等也易造成裂纹。

② 减少硬质合金钎焊裂纹的措施

a. 在钎缝中加补偿垫片是减小焊接应力的有效措施之一。在钎缝中加补偿垫片的方法很多,如用铁丝网、冲孔填片、镍铁合金垫片和在硬质合金上电镀纯铁等。由于这些补偿物的熔点高于钎料熔点 200°C 以上,钎焊时垫片不熔化而夹在钎缝中间。钎缝冷却时,硬质合金和基体金属之间的钎缝各层有充分的塑性变形,使钎缝各部分能比较自由地收缩,减小了钎焊应力,但是加补偿垫片会导致钎缝强度的大幅度下降(见表 6.58)。

表 6.58 钎缝中垫放附加材料对钎缝强度的影响

附加材料	硬质合金	基体材料	钎料	熔剂	钎缝平均剪切强度/MPa
铁丝网	YT15	45 钢	62 黄铜	脱水硼砂	121
镀镍铁	YT15	45 钢	62 黄铜	脱水硼砂	186
硬质合金镀铁	YT15	45 钢	62 黄铜	脱水硼砂	77

其中采用附加铁丝网或冲孔垫片的钎缝强度降低约 60%。由 50%Ni 和 50%Fe 所组成的 Ni-Fe 合金补偿垫片虽然能较好地消除应力和不降低钎缝强度,但因其中 Ni 含量过多,不宜在生产中大量使用。生产中用厚度为 0.4~0.5mm 的低碳钢片或镀镍铁片作补偿垫片,可取得很好的效果。

b. 采用双层硬质合金钎焊法是一种防止裂纹的有效措施。这种方法不需要特殊材料,便于推广使用。它能消除 YT30、YT60、YG2、YG3X 等高硬度硬质合金的钎焊裂纹。它是将高强度的 YG8 硬质合金作垫片与基体焊在一起,然后将强度低、硬度高的硬质合金再焊在它的上面。它的优点在于使钎焊应力集中在作为垫片的高强度硬质合金上,而上面容易产生裂纹的硬质合金因与 YG8 焊在一起,线胀系数比较接近,钎焊后应力小,不会产生裂纹。由于有两层硬质合金叠焊在一起,使整个硬质合金的抗压强度提高,增加了刀具的使用寿命。

c. 用紫铜片作补偿垫片时虽然可以有效地减小钎焊应力和防止产生裂纹,但须使用熔点低于 850℃ 的钎料,如 L-AG-49 银钎料,否则在钎焊时容易使紫铜片熔化而失去作用。用紫铜作垫片时,因紫铜本身比较软,不适于在冲击或重载荷和高温情况下使用。

d. 当钎焊狭长条形状的硬质合金工件时,为了减小钎焊应力和防止产生裂纹,可采用双层硬质合金钎焊,下面的一层是由小块硬质合金拼成,成为预制“裂纹”形式。这种方法对消除裂纹特别有效,可在大型硬质合金刀具和特殊硬质合金的模具上使用。

③ 硬质合金钎焊发生脱焊的原因

a. 硬质合金的钎焊面在焊前未经过喷砂或磨光处理,钎焊面上的氧化层降低了钎料的润湿作用,削弱了钎缝的结合强度。

b. 钎剂选择不当也会发生脱焊,例如采用生硼砂作为钎剂时,因生硼砂含水量较多而不能有效地起到脱氧作用,结果钎料不能很好地润湿被钎焊面,而发生脱焊现象。

c. 正确的钎焊温度应在钎料熔点以上 30~50℃ 时最为合适,温度过高或过低都可能发生脱焊。加热温度过高,会使钎缝中产生氧化现象。用含锌的钎料会使钎缝呈蓝色或白色。当钎焊温度过低时,会形成比较厚的钎缝,钎缝内部布满了气孔和夹渣。以上两种情况会使钎缝的强度下降,当刃磨或使用时容易发生脱焊。

d. 钎焊过程中没有及时地排渣或排渣不充分,使大量的钎剂熔渣残留在钎缝中,降低了钎缝的强度,造成脱焊。

6.4.3 石墨及金刚石的钎焊

(1) 石墨的钎焊

① 钎焊特点 石墨零件与金属结构件都是设备或仪器结构中所组成的构件或组合部件。例如机器结构中的某些导电装置、化学工业中的石墨阳极板、电解槽中电极连接以及发热体、核工业反应堆的连接件等。这些石墨与金属的连接大多数情况下都是采用钎焊方法实现的。石墨钎焊工艺中的技术关键是如何正确地选择易与石墨产生润湿的钎料,即这些钎料液态的流动性和铺展性,并能渗入石墨内气孔和毛细管作用的可能性程度。

石墨钎焊主要是通过钎料对石墨产生良好的润湿并能渗入石墨内部气孔和毛细通道,形

成了牢固的焊缝。与此同时,液态钎料还可渗透到较深的微细状气孔中。它除了与石墨形成化学键接合外,还可以起到机械键合作用,进一步加强了接头的牢固性。因此,石墨中的气孔率和尺寸的大小对接头的连接强度有较大的影响。

石墨钎焊一般可在大气条件下进行,但当温度超过 400°C 以上,就可迅速地产生氧化,往往得不到良好的接头质量。为保证获得良好的接头,在钎焊过程中应在保护气条件下进行,或在真空炉内施焊。保护气体一般都是采用氩气和氮气。

石墨材料也可采用电阻焊加热,并在真空 ($133.32 \times 10^{-3} \text{ Pa}$) 和氮气保护下完成石墨件的连接。但这种连接件的接头质量较差,性脆而强度低,在工程上很少得到应用。另外,采用热压成形高密度、气孔率极低的石墨件与金属的钎焊连接十分困难或缺陷严重。这主要是由于液态金属对石墨难以润湿且达不到渗入气孔隙的一定深度。在这种条件下,必须采用其他焊接方法。

② 钎料 在选择钎料时,应考虑石墨的成分是纯碳,它与许多金属能形成金属的碳化物,如 Ti、W、Mo、Nb、Cr、Ta、Zr、V 等。当这些金属液体与石墨接触时即可形成碳化物(如 TiC、WC、MoC 等),可使石墨与金属起化学反应而接合,具备了连接的基本条件。生产实践表明,含活性 Ti 的合金钎料,Ag 基、Cu 基以及 Ni 基等活性钎料对石墨材料均具有良好的润湿性和铺展性。采用正确的钎焊工艺均可获得良好的接头。表 6.59 列出了石墨钎焊用钎料及其工艺参数实例。

表 6.59 石墨钎焊用钎料及其工艺参数实例

连接材料	钎料主要成分/%	钎焊保护条件	钎焊温度/ $^{\circ}\text{C}$	应用实例
石墨+石墨	纯 Ti	真空, $133.32 \times 10^{-3} \text{ Pa}$	950	原子能燃料附件
石墨+石墨	79Ag-Cu	真空, $133.32 \times 10^{-3} \text{ Pa}$	1850	原子能燃料附件
石墨+石墨	Ni-Rh	真空, $133.32 \times 10^{-3} \text{ Pa}$	1850	原子能燃料附件
石墨+石墨	36~45Ni; 5~10Ti; Fe	氩气	1300~1400	SiC 发热体及电极
石墨+石墨	36~45Ni; 5~10Ti; Fe	氩气	1300~1400	SiC 发热体附件
石墨+石墨	80~90Ti; 20~50Ni; Si	氩气	1000~1050	电解槽电极部件
石墨+石墨	40~70Ti; 30~60Cu; Si	氩气	950~1000	电解槽电极部件
石墨+石墨	48Ti-48Cr-4Be	真空, $133.32 \times 10^{-3} \text{ Pa}$	1900	原子能燃料附件
石墨+石墨	35Au-35Ni-30Mo	真空及氩气	2000	原子炉燃料附件
石墨+石墨	直接电阻焊	真空及氩气	2000	原子炉燃料附件

③ 钎焊工艺 某化工设备中的热交换器结构件,为增强抗蚀能力,部分构件采用了石墨件。在解决石墨+石墨的连接问题方面,做了一系列的钎焊工艺试验。开始时曾采用 TIG 焊加热钎焊。由于 TIG 焊加热和冷却较快,钎料量也较多,导致焊口处的钎料厚度大,对尺寸较大的石墨件,往往焊后接头易产生裂纹,甚至产生剥离现象,而且加热时间较长,石墨也易于氧化,使接头质量下降。

试验结果表明,采用高频加热并在 Ar 气保护下,获得了良好的接头质量。由于真空高频炉内保护好,一般真空度为 $133.32 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 以上,在整个加热过程中不受氧化;其次就是所加入的钎料很薄 ($0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$),可显著降低应力,有利于改善抗热震性;由于高频加热,速度快,时间短,提高了效率。对于在高温中易挥发的钎料(如 Au-Ni-Mo),可以充入纯度较高的氩气进一步加强保护。另外,由于高频加热时,有集肤效应,对于尺寸较大的工件,能在较短时间内使表面与芯部的温度达到均匀,更容易焊透,对提高接头质量

有利。

生产实践中先后对 $\phi 90\text{mm}$ 圆柱形石墨件、对边长为 120mm 六角形石墨件进行了钎焊并取得了良好的效果,解决了生产技术关键问题。在生产实践中,正确选择钎焊时的钎料是至关重要的。因此,根据热交换器构件的技术要求、石墨钎焊特点,选用了 $64\text{Ni}-20\text{Cr}-8\text{Mo}-8\text{W}$ 的 Ni 基钎料。这种钎料除 Ni 外,还含有 Cr、Mo、W 等元素,这些元素都是碳化物元素。Cr、Mo、W 均易与石墨形成 Cr_7C_3 、 MoC 、 WC 碳化物,这对石墨钎焊非常有利。所采用的钎焊工艺参数:钎焊加热温度为 1250°C ,保温时间为 5min ,真空度为 $133.322 \times 10^{-4}\text{Pa}$,焊后的接头质量良好,达到了结构连接的使用性要求。经接头强度测试,获得了较高的室温和高温强度,见表 6.60。

表 6.60 石墨钎焊接头的强度

钎料成分系统	抗拉强度/MPa	剪切强度/MPa	断裂位置
64Ni-20Cr-8Mo-8W	28(室温)	27(室温)	石墨基体
64Ni-20Cr-8Mo-8W	22(800℃)	35(900℃)	石墨基体
石墨基体	21(室温)	—	石墨基体
石墨基体	35(900℃)	—	石墨基体

根据热交换器结构性能要求,石墨连接件必须承受住冷、热冲击的作用。所以,接头除进行力学性能测试外,还应进行热冲击、冷热循环试验。将已焊好的连接构件,在真空高频感应炉内,在 10min 内使构件升温到 700°C ,保温 10min ,然后切断电源,使结构件随真空炉自然冷却到常温,这样分别可进行 1 次、2 次、4 次或 10 次的热、冷循环。其结果均未发现接头及其附近区域有裂纹产生,达到了质量要求。

④ 石墨与金属的钎焊 当石墨与某种金属钎料连接时,其关键是要根据石墨与金属的钎焊性和构件的工作技术条件,正确选择既对石墨和金属具有良好的润湿性,又能产生金属碳化物 (TiC 、 WC 、 MoC 、 YC 等) 形成界面反应而接合。这就要求钎料中应含有形成碳化物的元素,如 Ti、W、Mo、Zr、V、Ta 等。此外,铜基和银基等活性钎料对石墨也具有较好的润湿性和流动性,但钎焊接头的使用温度一般不超过 400°C 。如果钎焊接头构件的使用温度超过 400°C (如 $400 \sim 800^\circ\text{C}$),应选择 Au 基、Pd 基或 Ti 基钎料;如使用温度范围 $800 \sim 1000^\circ\text{C}$,一般可选用 Ni 基、Co 基钎料;在 1000°C 以上时,可选用纯金属的 Au、Pd、Ti 等钎料。

a. 石墨与钛的钎焊 由于石墨具有良好的耐腐蚀性能,工业中电解槽结构中的石墨电极板和其他金属件都是由石墨+钛用钎焊连接而成的。这种电解槽的工作温度虽低,但必须

具有耐蚀性,尤其是具有耐碱性。电解槽石墨电极板结构示意图见图 6.10。

石墨与金属钛钎焊连接关键问题是如何较为准确地选择合适的钎料。实际上钛本身和含 Ti、Zr 系统钎料都具有活性。因此,含 Ti、Zr 等活性元素的钎料是首选。当然对润湿性较好的高温钎料 (如含 Au、Pd 等) 也可以选用。表 6.61 列出了适用于石墨与钛及其合金钎焊时的钎料成分。

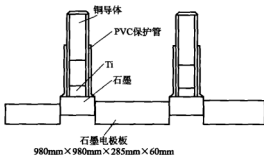


图 6.10 电解槽石墨电极板结构示意图

表 6.61 石墨与钛钎焊用钎料

连接材料	钎料成分/%	钎焊气氛	钎焊温度/℃	实例
石墨+钛	40~70Ti, 30~60Cu ₁ Si	Ar	950~1000	电解槽
石墨+钛	35Au-35Ni-30Mo	真空	1300	发热体
石墨+钛	49Ti-49Cu-2Be	真空	1900	反应堆
石墨+钛	71.5Ti-28.5Ni	真空	955~1200	核工业

b. 石墨与钼的钎焊 石墨与钼难熔金属件进行钎焊连接时, 一般情况下, 需要在真空条件下进行钎焊。但需要注意的是, 在钼一侧的界面尽可能减少金属间化合物产生, 因为金属间化合物具有脆性, 可使接头产生裂纹。为此, 一般是在焊前对金属 Mo 件清理之后, 先实行镀 Cr 或镀 Cu, 而且必须选择具有活性 (Ti 或 Zr) 元素的钎料。另外, 在钎焊过程中要保持高的真空度, 并采取有效措施, 避免氧、氮、氢的污染。

在放射性钼蒸气中的结构件采用石墨与钼管组件并采用钎焊方法完成了连接。其钎料的选择为活性钎料: 47.5Ti-47.5Zr-5Nb, 钎焊温度为 1600~1700℃。钎焊后的组件进行 1000℃放射性钼金属蒸气的侵扰试验。其试验结果, 未发现任何异常, 说明接头质量是良好的。

采用 72Ni-16Mo-7Cr-5Fe 钎料对石墨与金属钼件进行高频真空炉内钎焊, 也可获得良好的接头质量。X 射线衍射分析, 这种条件下获得的接头中, 在石墨与钎料的界面上仍存在着少量的石墨, 同时还有少量的 MoC、MoC₂ 以及 MoNi₄ 等中间金属化合物相, 不影响接头的性能。石墨与钼钎焊适用的钎料见表 6.62。

表 6.62 石墨与钼钎焊适用的钎料

连接材料	钎料成分/%	钎焊气氛	钎焊温度/℃	实例
石墨+Mo	47.5Ti-47.5Zr-5Nb	真空	1600~1700	原子反应堆
石墨+Mo	72Ni-16Mo-7Cr-5Fe	真空	—	核工业
石墨+Mo	49Ti-49Cu-2Be	真空	1900	核工业
石墨+Mo	71.5Ti-28.5Ni	真空	955~1150	核工业

c. 石墨与钨的钎焊 金属钨及其合金属于难熔金属, 熔点比较高。它与石墨的钎焊性质与金属钼差不多。为了改善钎焊性, 在焊前可对钨件表面 (指连接部位) 进行镀 Ni 或镀 Cr、Cu 等金属层, 可获得更高质量的连接接头。

钎料可选择 Ti-V-Cr (1550~1650℃)、Ti-Zr-Ta (1650~2100℃)、Ti-Zr-Ge (1300~1600℃)、Ti-Zr-Nb (1600~1700℃) 等活性高温钎料。表 6.63 中列出了石墨与钨钎焊适用的高温钎料。

表 6.63 石墨与钨钎焊适用的高温钎料

连接材料	钎料成分/%	钎料熔点/℃	实例
石墨+W	80Ni-10Ta-10Cr	1650~1750	核工业
石墨+W	85Ti-10Ta-5Cr	1600~1700	核工业
石墨+W	70Ti-20Cr-7Mo-3Ni	1320~1350	核工业
石墨+W	60Ti-20Cr-10Ta-7Mo-3Ni	1330~1450	核工业

d. 石墨与不锈钢的钎焊 石墨与不锈钢钎焊连接也属于高温钎焊。通常是惰性气体保护或在真空条件下实现其钎焊连接。在工艺上与上述的 W、Mo 件处理类似, 但在选用钎料

时可参考表 6.64 中的钎料成分。

表 6.64 石墨与不锈钢高温钎焊用钎料

连接材料	钎料成分/%	钎料熔点/℃	实例
石墨+不锈钢	4Ti-70Ni-18Cr-8Si	1125~1175	原子能工业
石墨+不锈钢	9Ti-65Ni-18Cr-8Si	1125~1175	电子器件

(2) 金刚石的钎焊

金刚石是目前世界上发现并在工业上能够大量使用的最硬的材料。它除了具有超硬特性外,还具有独特的力学、光学、声学、热学及电学性质,很难找到一种能像金刚石这样集多种优异性能于一身的材料。它既是一种重要的超硬材料,同时也是一种具有特殊用途的新型功能材料。

金刚石有天然金刚石和人造金刚石两大类,其具体分类方式比较多。天然金刚石常分为宝石级和工业级,其中工业级常根据产地分类。天然金刚石一般为单晶晶体。人造金刚石按使用要求可制成单晶晶体和多晶晶体。其中应用多晶制成的金刚石刀具包括聚晶金刚石(PCD)刀具和化学气相沉积(CVD)金刚石刀具。金刚石的性能特点如下。

a. 极高的硬度和耐磨性。天然金刚石的显微硬度高达 10000HV,比硬质合金、陶瓷的硬度高几倍,耐磨性为硬质合金的 80~120 倍。

b. 具有锋利的切削刃。人造金刚石的切削刃钝圆半径很小,可达 0.1~0.5 μm 。

c. 摩擦因数低。金刚石与黄铜、铝和纯铜之间的摩擦因数之比分别为 0.1、0.3 和 0.25,约为硬质合金刀具的 1/2,因此加工变形小。

d. 高的导热性及低的线胀系数。金刚石的热导率为硬质合金的 2~7 倍,而线胀系数只有硬质合金的 1/11 和陶瓷的 1/8。

e. 热稳定性较差。当温度超过 800℃时,人造金刚石就会被还原碳化而丧失切削能力,且在高温时金刚石中的碳元素与铁产生较强的化学亲和,碳元素会很快扩散到铁中去,而使刃口“破裂”。因此,金刚石刀具一般不适于加工铁系金属。

① 钎焊特点 金刚石的钎焊性较差,其难点主要在于大多数常用钎料对它难以润湿或不能润湿,并且金刚石的线胀系数低于大多数金属材料,容易在钎焊热应力和周围介质作用下改变性能。

由于单晶金刚石的直接钎焊极其困难,工业生产中选择了将金刚石与其他金属粉末预先制造成粉末冶金复合体,这些复合材料的钎焊相对容易得多。应用最为广泛的是用粉末冶金方式压制烧结的金刚石“刀头”,这类复合体的钎焊较为容易。刀头与基体的钎焊性主要取决于刀头底层的组成元素。目前,刀头配方主要有钴基、钨基、铜基、铁基、碳化钨基等几类,但是刀头底层主要由 Fe、Cu、Zn、Sn、Cd、WC、Al、Pb、P、C、特殊铜合金等组成。

在上述组分中,Pb 容易引发钎缝热裂纹;Sn、P 和 Cd 容易产生脆性疲劳源;强碳化物形成元素影响钎着率;Pb 和 C 影响润湿性。应当指出,Pb 和游离 C 对钎缝强度有致命影响:在钎焊过程中,它们形成钎焊粘渣严重破坏润湿性及钎料流动,导致刀头焊不上;另一方面,当铅含量达到 3%~5% (质量分数) 时,铅形成的脆性相和晶界效应产生的热裂纹源大大降低钎缝强度,甚至破坏刀头。

聚晶金刚石(简称 PCD)是由许多细颗粒单晶在高温高压下烧结而成。聚晶中的晶粒呈无序排列,其硬度、耐磨性在各方向相对接近,同时具有良好的断裂韧度。因此,可根据不同的使用条件制成不同的形状。为了更好地发挥 PCD 的性能,人们将聚晶金刚石薄层与硬质合金基体烧结在一起形成复合体,这就是聚晶金刚石复合片。聚晶金刚石和复合片都已

广泛用于制造金属切削刀具、石油钻头、地质钻探钻头、石材加工工具等。

聚晶金刚石钎焊的主要问题是润湿性、钎缝强度和钎焊温度。由于金刚石工具中的金刚石烧结体的材料千差万别,甚至同一个制造商的同一个配方也存在变动,给钎料和钎剂的选用带来极大困难。经常有不同批次的刀头的钎焊性存在很大差异的现象发生。由于刀头的烧结温度仅仅比钎焊温度高几十度,再加上刀头的孔隙度比较高,钎焊过程中钎料与刀头的相互作用极为显著。研究表明:不到 20s 的钎焊时间内,钎料可以因毛细作用渗透到刀头内部 8~12mm,而刀头内的 Sn、Pb、Zn 等低熔点金属可以从刀头内部 5~8mm 处扩散到钎缝中。

② 钎焊方法 火焰钎焊和盐浴钎焊主要在金刚石锯片生产早期得到应用。随着电力电子技术的飞速发展,高频焊机的技术性和经济性已占据垄断地位。但火焰钎焊的低投入和盐浴钎焊的微变形的突出特点,使这两种钎焊工艺仍有一席之地。

电阻钎焊时,刀头温度较高,影响金刚石的使用寿命。但电阻钎焊的焊缝耐高温,焊接的锯片可以干切,目前有少数企业采用这种工艺。炉中钎焊和真空钎焊是近几年开始应用于金刚石工具制造的,在小锯片生产、单层金刚石工具的制造中有不可替代的优势。

电弧钎焊和电阻钎焊的工艺性优于高频感应钎焊,但由于其设备开发滞后,这几种工艺没有得到大面积应用。激光焊和电子束焊接是近几年发展起来的高新技术。激光焊接的能量密度高;电子束焊接的能量输出大,可焊透深度大。虽然激光焊和电子束焊接方法已有 20 多年的历史,高能束流焊接在金刚石锯片生产中的应用仍处于起步阶段,这主要是因为设备投资较大,限制了这两项技术的发展。

③ 钎料与钎剂

a. 钎料 金刚石工具工作过程钎缝受力状态以交变剪切应力为主,并且钎缝区温度场不稳定;部分产品使用寿命长,要求钎缝抗疲劳能力强;有时工作温度较高,要求钎缝耐热。因此钎焊金刚石常用的钎料有四大类:银基钎料,通用性最强,几乎可以用于所有的金刚石工具;镍基钎料,主要用于单层金刚石工具的真空钎焊;软钎料,主要用于研磨模具;铜基钎料,主要用于高温下工作工具的氩弧钎焊、激光钎焊和石油钻头的浸渍钎焊。

银基钎料应该满足下列条件:钎料熔化温度不高于 850℃,以 600~750℃最好;钎料塑性好、耐冲击;抗高温蠕变能力强;流铺性适中,适宜通用的感应钎焊、火焰钎焊、电阻钎焊、炉中钎焊或浸渍钎焊;对以 Fe 或 Cu 为主的粉末冶金材料、聚晶金刚石、合金钢和硬质合金的润湿性好;性能稳定、可靠性高。

金刚石钎焊常用钎料见表 6.65。可以根据工件承受载荷的性质以及其他使用要求选择。金刚石磨具钎焊常用的软钎料见表 6.66。

表 6.65 金刚石钎焊常用钎料

牌号	化学组成	熔化温度范围/℃	抗拉强度/MPa	主要特性
BAG611	AgCuZnCdNi	620~630	410	流动性好、塑性好,焊接强度高
BAG612	AgCuZnCdNi	630~685	440	填充性好、抗疲劳能力强,综合性能优,适用于高档金刚石的自动焊接
5009	AgCuZnCdNi	630~680	440	
DIA44N	AgCuZnNi	660~780	410	强度高、耐高温,但焊接温度较高
Lag40Cd	Ag40CuZnCd	595~630	390	流动性好、塑性较好,综合性能优
L303	Ag45Cu30Zn	665~745	390	流动性好、塑性较好、钎缝表面光洁
L304	Ag50Cu34Zn	690~775	410	塑性好、钎缝耐震动、钎缝表面洁白
L312	Ag40CuZnCd	595~605	390	熔点最低、综合性能优
L322	Ag40CuZnSn	630~640	390	流动性好、钎缝表面洁白,无循环环保

续表

牌号	化学组成	熔化温度范围/℃	抗拉强度/MPa	主要特性
L301	Ag10CuZn	710~850	451	强度高,耐高温,但焊接温度较高
905	Ag40CuZnSn	665~750	360	流动性好、钎缝表面光洁,无偶环保
BAG-2	Ag35CuZnCd	610~710	390	适用于石材行业金刚石锯片、组合锯片、金刚磨盘、陶瓷行业滚筒磨轮等的焊接
Z21	AgCuZnCd	602~725	370~410	适用于石材行业金刚石锯片、组合锯片、金刚磨盘、陶瓷行业滚筒磨轮等的焊接
Z31	AgCuZnCd	605~730	360~390	
Z35	AgCuZnCd	610~740	360~390	适用于金刚石锯片、组合锯片、金刚磨盘等的焊接
Z12	AgCuZnCd	605~756	370~390	
Z41	AgCuZnCd	610~765	360~390	适用于金刚石锯片、组合锯片、金刚磨盘等的焊接
Z45	AgCuZnCd	615~775	360~380	
Z46	AgCuZnCd	620~785	340~360	适用于金刚石锯片、金刚磨盘等的焊接,经济性好
CT715	AgCuZnCdNi	620~795	340~360	
Z51	AgCuZnCd	620~820	368~390	适用于金刚石锯片、金刚磨盘等的焊接,经济性好
Z53	AgCuZnCd	630~830	340~360	
Z55	AgCuZnCd	630~840	340~360	
Z59	AgCuZnCd	630~850	340~360	
CT643	AgCuZnNi	670~780	400~415	强度高、耐高温,但焊接温度较高
CT639	AgCuZnNiMn	660~785	414~427	

表 6.66 金刚石磨具钎焊常用的软钎料

牌号	化学组成	熔化温度范围/℃	抗拉强度/MPa	主要特性
HL605	SnAg3.5	221~232	54	流动性和润湿性较好
HL607	Sn32PbZnCd	150~210	45~55	温度低,稳定性优于黏结剂
HL501	Zn58Sn40Cu	198~355	88	通用性好
HL502	Zn60Cd	266~335	50~70	适宜于铝基底料
HL505	Zn72.5Al	430~500	190~220	流动性差,对钎剂要求高
HL506	Cd83Zn	266~270	80~90	价格低,适宜于铁基底料
Degussa	Zn88Ag	431~525	100~120	润湿性差,适宜于铜基底料,要求特种钎剂
HLAgCd96-1	Cd96AgZn	300~325	110	适宜于铁基底料
Cd84AgZnNi	Cd84AgZnNi	360~380	160~190	适宜于铁基底料
Cd79ZnAg	Cd79ZnAg	278~288	90~100	适宜于铁基底料
CT760	CdZnAgCuSn	285~325	180~210	强度高、耐热性好,适宜于铜基、铁基、锡基等各种底料
CT780	CdZnAgCu	298~355	220~260	

b. 钎剂 金刚石钎焊使用钎剂的目的主要有三个。

- 去除基体、刀头和钎料表面的氧化物,为液态钎料在基体、刀头上的铺展和钎料向刀头渗透创造必要条件。
- 液态钎剂薄层覆盖基体、刀头和钎料表面,避免它们二次氧化,阻止金刚石碳化。
- 起界面活性作用,改善钎料对钎焊面的润湿,促进钎料流动、填充间隙,形成光滑致密的钎缝。

金刚石钎焊所用的硬钎剂主要是以硼酸、硼砂为基体,再添加某些碱金属(或碱土金属)的氟化物、氟硼酸盐、硼单质混合成的混合物;软钎剂以氯化物、水或酒精溶液为主。

钎剂的配用主要参考钎焊温度和刀头组成成分。当刀头中含有钽、铬、钼、锆、锌、铅时,需要选用高活性的钎剂;以铁、铜、镍为主烧结的刀头,选用 FB102 或 FB104 钎剂。金刚石钎焊常用钎剂见表 6.67。

表 6.67 金刚石钎焊常用钎剂

牌号	化学组成(质量分数)/%	作用温度范围/℃	主要特性
QJ205	$\text{ZnCl}_2 50; \text{NH}_4\text{Cl} 15; \text{CdCl}_2 30; \text{NaF} 5$	300~450	磨磨条钎焊
	$\text{ZnCl}_2 50; \text{NH}_4\text{Cl} 20; \text{CdCl}_2 25; \text{其他} 5$	400~550	
FB102	氯化钾 42; 氯酸钾 23; 硼酐 35	600~850	应用广泛
FB104	氯化钾、硼酸、硼砂	650~850	应用于低银钎料
FB105	硼酸、氯化钙、硼砂	800~980	应用于含镍钎的无银钎料
气态钎剂	硼酸三甲酯	750~900	火焰钎焊用,保护金刚石
膏状钎剂	FB102+单质硼+载体	780~980	自动钎焊用,活性强

④ 钎焊工艺参数对接头性能的影响 金刚石工具的钎缝强度主要取决于钎料、钎焊工艺和刀头材料。所用钎料的力学性能是决定钎缝强度的主要因素。一般情况下,银铜锌钎料的强度高于银铜锡钎料;银铜锌镍钎料的强度又高于银铜钎料;银铜锌镍钴钎料的强度最高。但是银铜锡钎料的钎焊温度低、钎焊工艺性好、经济性好。

钎焊工艺主要通过润湿性、气孔率、夹杂率、钎缝厚度及钎焊热影响区的残余应力等参数影响钎焊接头的力学性能。这些参数主要由焊前处理、焊后处理、加热时间、保温时间、加热频率决定。在工艺评定中,抗剪强度是主要技术参数;在生产实践中,润湿面积、流动性、钎着率、夹杂率及气孔率可以作为焊接质量的主要考察对象。

钎焊接头的力学性能主要取决于钎料成分和钎焊工艺,但片状钎料的厚度也影响接头的抗剪强度和疲劳强度,即钎缝性能还与焊前添加的钎料厚度相关。实验研究表明:当钎料成分和钎焊工艺一定时,焊片厚度在 0.20~0.28mm 之间时,钎缝的综合力学性能最高。当钎料厚度过小时,钎料不能充分润湿结合面,钎着率不高,钎缝强度较低。钎焊过程中刀头中的 Sn、Pb、Fe、W、Ti 等元素向钎缝扩散、溶解,促使钎缝组织脆化,降低接头强度。当钎缝厚度过大时,钎缝中容易产生气孔,减小有效钎接面积,降低抗剪强度。

在钎焊加热过程中,与钎焊接头力学性能相关的主要因素有:加热速度、钎焊温度、保温时间、冷却速度等。这些因素通过影响润湿性、气孔率改变接头力学性能。为了追求生产效率,经常使用很高的速率加热;当加热速度太高时,钎焊后的残余应力较大。这是因为刀头中各组元的线胀系数相差很大,例如 Zn、Pb、Sn、Mn、Co 等元素的线胀系数是 WC、W、Cr 的几倍,不同组元的热变形差异产生内应力。过低的加热速度不仅降低生产率,也加剧钎缝金属的氧化。两级加热工艺能较好地解决这个矛盾,第一阶段加热到 400~500℃,保温一段时间后再继续升温焊接。

钎焊温度影响润湿性、气孔率,最终决定连接强度。当钎焊温度过低时,钎料的流动性差,易产生夹渣、造成假焊,使接头强度降低;当温度过高时,钎料氧化严重,造成夹渣、锌的急剧蒸发,引发气孔,从另一方面导致接头强度降低。

保温时间对接头力学性能的影响。保温的目的有三个:促进钎料对基体和刀头充分地润湿与扩散;排除钎缝中的气体;给钎剂充分的时间使之还原氧化膜并以渣的形式排出。保温时间短时,钎料与刀头不能很好地润湿,不足以形成扩散下的晶间结合;而且钎剂还原物和钎剂结晶水形成的蒸汽不易排除,造成夹渣和气孔,甚至未焊透。过长时间的保温,使钎料氧化、锌挥发、钎料流失,导致钎缝强度大大降低。

第7章 真空扩散焊

真空扩散焊是在一定的温度和压力下,经过一定时间的保温,真空环境中连接界面的原子间相互扩散而实现的可靠连接,属于固相连接方法。主要用于传统的熔焊方法难以焊接的异种金属材料、陶瓷、金属间化合物、复合材料的连接。近年来,扩散连接技术发展很快,已被应用于航空航天、仪表及电子、核工业、汽车制造等部门。

7.1 真空扩散焊设备及工艺

7.1.1 真空扩散焊设备

扩散焊时须保证连接面及被连接金属不受空气的影响,必须在真空或惰性气体介质中进行。现在采用最多的方法是真空扩散焊。真空扩散焊可以采用高频、辐射、接触电阻、电子束及辉光放电等方法,对工件进行局部或整体加热。工业生产中应用的扩散焊设备,主要采用感应和辐射加热的方法。

真空扩散焊设备主要是由带有真空系统的真空室、加热系统、对工件的加压系统、对温度和真空度的检测系统以及控制装置组成。无论何种加热方式的真空扩散焊设备都主要由以下几部分组成。

(1) 真空室

真空室越大,要达到和保持一定的真空度,对所需真空系统要求越高。真空室中应有由耐高温材料围成的均匀加热区,以保持设定的温度;真空室外壳需要冷却。

(2) 真空系统

一般由扩散泵和机械泵组成。机械泵只能达到 $1.33 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 的真空度,加扩散泵后可以达到 $1.33 \times 10^{-4} \sim 1.33 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 的真空度,可以满足材料的扩散焊要求。真空度越高,越有利于被焊材料表面杂质和氧化物的分解与蒸发,促进扩散焊的顺利进行。但真空度越高,抽真空的时间越长。按真空度可分为:低真空、中真空、高真空等。

(3) 加热系统

一般由感应线圈和高频电源组成。根据不同的加热要求,辐射加热可选用钨、钼或石墨作加热体,经过高温辐射对工件进行加热。按加热方式分为:感应加热、辐射加热、接触加热等。

(4) 加压系统

扩散焊过程一般要施加一定的压力。在高温下材料的屈服强度较低,为避免构件的整体变形,加压只是使接触面产生微观的局部变形。扩散焊所施加的压力较小,压强可在 $1 \sim 100 \text{ MPa}$ 范围内变化。只有当材料的高温变形阻力较大,或加工表面较粗糙,或扩散焊温度较低时,才采用较高的压力。目前主要采用液压和机械加压系统。

(5) 测量与控制系统

现在应用的扩散焊机都具有对温度、压力、真空度及时间的控制系统。可实现对温度从 $20 \sim 2300^\circ\text{C}$ 的测量与控制,温度控制的精度可在 $\pm(5 \sim 10)^\circ\text{C}$ 。压力的测量与控制一般是通过压力传感器进行的。

(6) 水冷系统

一般通过水循环系统进行冷却。扩散焊设备启动前,首先应接通水循环。

扩散焊设备种类繁多,目前采用较多的是感应加热方式。表 7.1 列举了几种真空扩散焊设备的主要技术参数。

表 7.1 真空扩散焊设备的主要技术参数

设备型号或类型	ZKL-1	ZKL-2	高真空扩散焊机	HKZ-40	DZL-1
加热区尺寸/mm	φ600×800	φ300×400	φ300×350	300×300×300	—
真空度/Pa	冷态	3×10^{-3}	1.33×10^{-6}	1.33×10^{-3}	7.62×10^{-4}
	热态	5×10^{-3}	1.33×10^{-5}	—	—
加压能力/kN	245(最大)	58.8(最大)	50	80	300
最高炉温/℃	1200	1200	1350	1300	1200
炉温均匀性/℃	1000±10	1000±5	—	1300±10	1200±5

美国真空工业公司生产的 Workhorse II 型真空扩散焊设备,其主要性能指标如表 7.2 所示。该扩散焊设备主要由真空室、真空泵系统、液压系统、水循环系统、控制仪表等几部分组成。真空泵系统由机械泵和扩散泵构成,可以提供 1.33×10^{-5} Pa 以上的高真空度。扩散焊时压力的施加和保持由液压系统完成。控制仪表主要由数字控制处理器、程序逻辑控制器、计算机以及加热温度、压力、真空度的测量和记录仪器等组成。

表 7.2 Workhorse II 型真空扩散焊设备的主要性能指标

型 号	主要性能指标					
3033-1305-30T	真空室尺寸/mm	最高加热温度/℃	最大压力/t	真空度/Pa	加热功率/kW	保护气体
	304×304×457	1350	30	6.65×10^{-5}	45	N ₂ 、Ar

由于整套设备采用了计算机控制,真空扩散焊过程实现了全部自动运行,并可对各工艺参数获得相当高的控制精度。真空扩散焊的加热温度、焊接压力、保温时间、真空度等参数可以通过预先编制的程序控制整个焊接过程,提高了焊接过程的精度和可靠性。

7.1.2 扩散焊工艺及主要参数

真空扩散焊的工艺流程一般包括以下阶段:工件表面处理、工件装配、装炉、扩散焊接(包括抽真空、加热、加压等)、炉冷。

(1) 接头形式与表面清理

① 工件表面处理及装配 为了使工件得到满意的扩散焊结合,被焊接件必须满足以下两个必要条件。

- 使焊件表面金属与金属间达到紧密接触。
- 必须对有妨碍的材料表面污染物加以破坏和分解,以便形成金属间结合。

金属表面一般不平整,附着有氧化物或其他固态或液态产物(如油脂、灰尘等),吸附有气体或潮气。待焊件组装前须对工件表面进行仔细处理。表面处理不仅包括清洗,去除表面膜层(氧化物),清除气、水或有机物表面膜层;还有对金属表面粗糙度的要求。

对工件表面的最小平直度和最小粗糙度有一定的要求。常用的金属切削和研磨抛光的方法能够加工出所要求的表面平直度和粗糙度。机械加工或磨削的附带效果是引起表面的冷作硬化,冷作硬化表面的再结晶有增加界面附近扩散速度的倾向。

② 焊前清理 对工件进行焊前清理的化学腐蚀有两个作用。

- 去除非金属表面膜(通常是氧化物)。

b. 部分或全部去除在机械加工时形成的冷作硬化层。

除油是表面清理工序的必要部分。可使用乙醇、三氯乙烯、丙酮、洗涤剂以及其他清洁剂,也可用在真空中加热的方法来获取清洁的表面。有机物或水、气的吸附层通过在真空中加热很容易去除,但大多数氧化物在真空加热时不分解。真空清洁处理后的零件要求随即在真空或控制气体中保存,以免重新形成化学吸附层。

表面处理还需考虑具体的焊接条件。如果在很高的温度或压力下扩散连接,获得特别清洁的表面就不十分重要了。原子活性、表面凹凸变形以及杂质元素溶解有助于使表面污染物分解。在较低温度和较低压力下焊接时有必要进行较严格的表面处理。

工件表面处理后须对清洁的表面进行保护,有效的方法是在扩散焊过程中采用保护性气氛,真空环境能够长时间防止污染。氢、氦也可用于在高温下保护清洁的表面,但使用这些气体时纯度必须很高,以防止造成重新污染。

工件装配是扩散焊最终得到质量良好的扩散焊接头的关键步骤之一。待焊表面紧密接触可以使被连接面在较低的温度或压力下实现完整、可靠的结合与连接。

(2) 中间层的选择

在工件之间增加中间层是异种材料扩散焊的有效手段之一,特别是对于原子结构差别很大的材料。中间层的作用主要是改善材料表面的接触,降低对待焊表面制备的要求,降低所需的压力;改善扩散条件(加速扩散过程、降低扩散焊温度、缩短扩散焊时间);改善冶金反应,避免或减少形成脆性金属间化合物的倾向。

① 所选择的中间层材料应具有以下特点。

- 容易发生塑性变形;含有加速扩散的元素,如B、Si、Be等。
- 物理化学性能与母材的差异较被焊材料之间的差异小;不与母材发生不良冶金反应,如产生脆性相或不希望的共晶相。
- 不会在接头上引起电化学腐蚀问题。

中间层通常是熔点较低(但不低于扩散焊接温度)、塑性较好的纯金属,如铜、镍、铝、银等,或者与母材成分接近的含有少量易扩散的低熔点元素的合金。

中间层厚度一般为几十微米,以利于缩短均匀化扩散的时间。厚度在 $30\sim 100\mu\text{m}$ 时,可以箔片的形式夹在待焊表面间。不能轧制成箔片的中间层材料,可以采用电镀、真空蒸镀、等离子喷涂的方法直接将中间层材料涂覆在待焊表面。镀层厚度可以仅有几微米。中间层厚度可以根据最终成分来计算、初选,通过试验修正确定。

② 阻焊剂。为了防止压头与工件之间某些区域被扩散焊粘接在一起,需加阻焊剂(片状或粉状)。阻焊剂应具有以下性能。

- 有高于焊接温度的熔点或软化点。
- 具有较好的高温化学稳定性,在高温下不与工件、夹具或压头发生化学反应。
- 不释放出有害气体污染附近的待焊表面,不破坏保护气氛或真空度。

例如:钢与钢扩散焊时,可以用人造云母片隔离压头;钛与钛扩散焊时,可以涂一层氮化硼或氧化钨粉。

(3) 扩散焊的工艺参数

扩散焊最主要的工艺参数为加热温度、压力、保温时间和真空度,这些因素是相互影响的。

① 加热温度 加热温度是扩散焊最重要的工艺参数,加热温度的微小变化会使扩散速度产生较大的变化。在一定的温度范围内,温度越高,扩散系数越大,扩散过程越快,所获得的接头结合强度越高。但当温度高于某一定值后,温度再提高时,扩散焊接头质量提高不

多,有时反而有所下降。

对于许多金属和合金,扩散焊合适的加热温度一般为 $(0.6 \sim 0.8)T_m$ (T_m 为母材熔点, $^{\circ}\text{C}$)。表 7.3 给出一些金属材料的扩散焊温度与熔化温度的关系。对于出现液相的扩散焊,加热温度应比中间层材料熔点或共晶反应温度稍高一点。液相填充间隙后的等温凝固和均匀化扩散温度可略微降低一些。

表 7.3 一些金属材料的扩散焊温度与熔化温度的关系

金属材料	扩散焊温度 $T/^{\circ}\text{C}$	熔化温度 $T_m/^{\circ}\text{C}$	T/T_m
银(Ag)	149	960	0.34
铜(Cu)	160	1083	0.32
70-30 黄铜	271	916	0.46
20 钢	438	1510	0.40
钛(Ti)	538	1815	0.39
45 钢	800(1100)	1490	0.61(0.78)
铍(Be)	950	1280	0.78
2%铍铜	802	1071	0.80
347 不锈钢	999(1199)	1454	0.74(0.85)
铌(Nb)	1149	2415	0.53
钽(Ta)	1316	2996	0.49
钼(Mo)	1260	2625	0.53

② 压力 施加压力的主要作用是使接合面微观凸起的部分产生塑性变形,达到紧密接触,同时促进界面区的扩散,加速再结晶过程。增加压力能提高接头强度,但过大的压力会导致工件变形。高压需要成本较高的设备和精确的控制。从经济角度考虑,应选择较低的压力。

采用较高的压力能产生结合强度较好的接头,如图 7.1 所示。对于异种金属扩散焊,采用较大的压力对减少或防止扩散孔洞有良好作用。通常扩散焊采用的压力在 $0.5 \sim 50\text{MPa}$ 之间。由于压力对扩散的第二、三阶段影响较小,在固态扩散焊时可在后期将压力减小,以便减小工件变形。

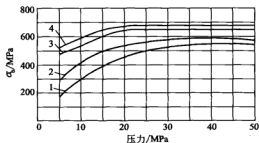


图 7.1 焊接接头强度与压力的关系
(保温时间 5min)

1— $T=800^{\circ}\text{C}$; 2— $T=900^{\circ}\text{C}$; 3— $T=1000^{\circ}\text{C}$; 4— $T=1100^{\circ}\text{C}$

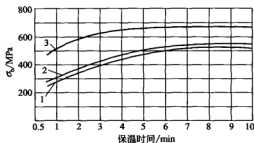


图 7.2 扩散焊接头强度与保温时间的关系
(低合金结构钢, 压力 20MPa)

1— $T=800^{\circ}\text{C}$; 2— $T=900^{\circ}\text{C}$; 3— $T=1000^{\circ}\text{C}$

③ 保温时间 保温时间是指被焊工件在焊接温度下保持的时间。在该保温时间内必须保证扩散过程全部完成,达到所需的结合强度(如图 7.2 所示)。保温时间太短,扩散焊接头达不到稳定的与母材相等的强度。但高温、高压持续时间太长,对扩散接头质量起不到进

一步提高的作用,反而会使母材的晶粒长大。对可能形成脆性金属间化合物的接头,应控制保温时间以控制脆性层的厚度,使之不影响接头性能。

保温时间与温度、压力是密切相关的,大多数由扩散控制的反应都是随时间变化的。温度较高或压力较大时,时间可以缩短。在一定的温度和压力下,初始阶段接头强度随时间延长而增加,但当接头强度提高到一定值后,便不再随时间而增加。焊接时间可以在一个较宽的范围内变化,但从提高生产率考虑,在保证强度条件下,保温时间越短越好。

图7.3所示是钛合金扩散焊时压力与最小连接时间的关系。对于加中间层的扩散焊,保温时间还取决于中间层厚度和对接头化学成分、组织均匀度的要求。

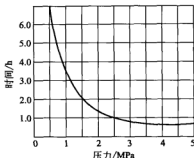


图7.3 压力与最小连接时间的关系
(926℃时 Ti-6Al-4V 板的低压扩散焊)

④ 保护气氛 保护气氛的纯度、流量、压力或真空度、漏气率都会影响扩散焊接头的质量。常用的保护气体是氩气,真空度通常为 $(1\sim 20)\times 10^{-3}$ Pa。有些材料也可以采用高纯度氮、氢或氢气。在超塑性成形和扩散焊组合工艺中常用氩气负压(低真空)保护钛板表面。

对于在冷却过程中有相变的材料以及陶瓷类脆性材料,在扩散焊时,加热和冷却速度应加以控制。共晶反应扩散时,加热速度太慢,会因扩散而使接触面上的化学成分发生变化,影响熔融共晶的生成。

⑤ 表面准备 扩散焊组装之前必须对工件表面进行认真准备,其表面准备包括:加工符合要求的表面光洁度、平直度、去除表面的氧化物,消除表面的气、水或有机物膜层。表面的平直度和光洁度是通过机械加工、磨削、研磨或抛光得到的,经过抛光的表面微观凹凸不平可达到50nm。表面氧化物和加工硬化层通常采用化学腐蚀方法,应注意的是化学腐蚀后要用酒精和水清洗。

表面去油一般用乙醇、三氯乙烯、丙酮等清洗剂,可以在多种溶液中反复清洗。这类清洗剂有毒,使用时应注意安全。真空加热可以有效地清除有机物、水和气体吸附层,烘烤温度一般不超过300℃。

扩散焊接头质量与保护气体、母材及中间层的冶金物理性能等有关。表面准备之后,必须随即对清洁的表面加以保护,保护措施可以在真空环境中或加氢、氩、氮等保护气氛。

7.1.3 扩散焊接头常见缺陷及防止

扩散焊接头的主要缺陷有未焊透、裂纹、变形等,影响因素也较多。表7.4列出扩散焊接头常见缺陷及产生的主要原因。

表7.4 扩散焊接头常见缺陷及产生的主要原因

缺 陷	缺陷产生的原因
出现裂纹	升温 and 冷却速度太快,压力太大,加热温度过高,加热时间太长;焊接表面加工精度低
未焊透	加热温度不够,压力不足,焊接保温时间短,真空度低 焊接夹具结构不正确或在焊接真空室里零件安装位置不正确;工件表面加工精度低
残余变形	加热温度过高,压力太大,焊接保温时间过长
局部熔化	加热温度过高,焊接保温时间过长;加热装置结构不合理或加热装置与工件的相应位置不对
错位	焊接夹具结构不合适或在焊接真空室里工件安放位置不对,工件错位

扩散焊接头的质量检验方法如下。

- ① 采用着色、荧光或磁粉探伤来检验表面缺陷。
- ② 采用真空、压缩空气以及煤油实验等来检查气密性。
- ③ 采用超声波、X 射线探伤等检查接头的内部缺陷。

由于焊接接头结构、工件材料、技术要求不同，每一种方法的检验灵敏度波动范围较大，要根据具体情况选用。

7.2 不同材料的真空扩散焊

扩散焊几乎适合各种材料的焊接，特别是适合于特种材料、特殊结构的焊接。虽然扩散焊的生产成本稍高一些，但在航空航天、电子和核工业等质量更为重要的场合，得到相当成功的应用。许多零部件的使用环境恶劣，加之产品结构要求特殊，设计者不得不采用特种材料（如为减轻重量而采用空心结构），而且要求焊接接头与母材成分、性能上接近。在这种情况下，扩散焊成为最优先考虑的焊接方法。

7.2.1 同种材料的扩散焊

扩散焊几乎可以焊接各类高温合金，如机械化型高温合金，含高 Al、Ti 的铸造高温合金等。高温合金中含有 Cr、Al 等元素，表面氧化膜很稳定，难以去除，焊前必须严格加工和清理，甚至要求表面镀层后才能进行固相扩散焊接。

碳钢较易于用熔焊方法焊接，所以通常不采用扩散焊。但要在大气平面形成高质量接头的产品时，则可采用扩散焊。各种高碳钢、高合金钢也能顺利进行扩散焊。同种材料扩散焊的压力在 0.5~50MPa 之间选择。在正常扩散焊温度下，从限制工件变形考虑，压力可在表 7.5 所示范围内选取。

表 7.5 同种金属扩散焊常用的压力

MPa

材 料	碳钢	不锈钢	铝合金	钛合金
普通扩散焊压力	5~10	7~12	3~7	—
热等静压扩散焊压力	100	—	75	50

实际生产中，工艺参数的确定应根据试焊所得接头性能选出一个最佳值（或最佳范围）。表 7.6 列出了一些常用金属材料扩散焊的工艺参数。

表 7.6 常用金属材料扩散焊的工艺参数

序号	被焊材料	中间层合金	加热温度/℃	保温时间/min	压力/MPa	真空度/Pa
1	20 钢	—	950	6	16	1.33×10^{-5}
2	30CrMnSiA	—	1150~1180	12	10	1.33×10^{-5}
3	W18Cr4V	—	1100	5	10	1.33×10^{-4}
4	12Cr18Ni10Ti	—	1000	10	20	2.67×10^{-5}
5	12Cr13	—	1050	20	15	1.33×10^{-5}
6	不锈钢 2Cr13	—	940~960	10	15	1×10^{-1}
7	可伐合金	—	1100	25	20	1.33×10^{-5}
8	铝合金 2Al4(LY14)	—	540	10~30	4	1.33×10^{-3}
9	钛合金 TC4	—	900~930	60~90	1~2	1.33×10^{-3}

续表

序号	被焊材料	中间层合金	加热温度/℃	保温时间/min	压力/MPa	真空度/Pa
10	Ti ₃ Al 合金	—	960~980	60	8~10	1.33×10^{-5}
11	铜	—	1000~1010	5	57	1×10^{-5}
12	Cu	—	800	20	6.9	还原性气氛
13	H72 黄铜	—	750	5	8	—
14	铍	—	1000	15~20	3	1×10^{-2}
15	铝	—	1700	5	10	—
16	Mo	—	1050	5	16~40	1×10^{-2}
17	Nb	—	1200	180	70~100	1×10^{-3}
18	Nb	Zr	598	—	—	—
19	Ta	Zr	598	—	—	—
20	Zr2	Cu	767	30~120	0.21	—
21	AlSi410	Ni+Be9%~10%	931	5	0.007	—
22	铈	—	2000	20	23	—
23	铸铁	—	800	20	30	6.6×10^{-2}

钛是一种强度高、重量轻、耐腐蚀、耐高温的高性能材料，广泛地应用在航空、航天工业中。多数钛合金结构要求减轻重量，接头质量比制造成本更重要。因此，较多地应用扩散焊方法。

钛合金不需要特殊的表面准备和特殊的控制就可容易地进行扩散焊接。常用焊接工艺参数为：加热温度 855~957℃，保温时间 1~4h，焊接压力 2~5MPa，真空度 1.33×10^{-2} Pa 以上。应注意，钛能大量吸收 O₂、H₂ 和 N₂ 等气体，因此不宜在 H₂、N₂ 气氛中焊接。

镍合金主要用于耐高温、耐腐蚀及高韧性的条件下，其熔焊的焊接性差，熔化焊时接头强度远低于母材，因此较多地应用扩散焊。由于镍合金的高温强度高，须在接近其熔化温度和相当高的压力下进行焊接，须仔细地进行表面准备，还必须在焊接过程中严格控制气氛，防止表面污染，通常还需要纯镍或镍合金作中间层。

镍合金扩散焊的工艺参数：加热温度 1093~1204℃，保温时间 0.5~4h，焊接压力 2.5~10.7MPa，真空度 1.33×10^{-2} Pa 以上。焊接参数还与零件的几何形状有关，要获得满意的焊接质量需进行多次实验。

铝及其合金的扩散焊有一定的困难，主要是清洗好的工件在空气中很快会生成一层氧化膜。铝与氧的亲合力很大，还原性很强，在常温下铝也容易与空气中的氧化合，生成密度比铝本身高的氧化铝，这使铝的焊接很困难。

铝与铝直接扩散焊需要较高的加热温度（不得超过铝的软化温度）、较大的压力和高真空度。还可采用加中间扩散层的方法，中间层的材料可用 Cu、Ni 和 Mg 等，这时压力和加热温度都可降低。

高温合金的热强性高，变形困难，同时又对过热敏感，因此必须严格控制焊接参数，才能获得与母材等强的焊接接头。高温合金扩散焊时，需要较高的焊接温度和压力，焊接温度为 $(0.8 \sim 0.85)T_m$ （ T_m 为合金的熔化温度）。

焊接压力通常为略低于相应温度下合金的屈服应力。焊接压力越大，界面变形越大，粗糙度降低，有效接触面积增大，接头性能越好；但焊接压力过高，会使设备结构复杂，造价昂贵。焊接温度较高时，接头性能提高，但过高会引起晶粒长大，塑性降低。几种高温合金真空扩散焊的工艺参数见表 7.7。

表 7.7 高温合金真空扩散焊的工艺参数

合金牌号	加热温度/℃	保温时间/min	压力/MPa	真空度/Pa
GH3039	1175	6~10	29.4~19.6	1.33×10^{-2}
GH3044	1000	10	19.6	
GH99	1150~1175	10	39.2~29.4	
K403	1000	10	19.6	

含铝、钛高的沉淀强化高温合金扩散焊时, 由于结合面上会形成 $\text{Ti}(\text{CN})$ 、 NiTiO_3 沉淀物, 造成接头性能降低, 若加入较薄的 Ni-35\%Co 中间层合金, 则可以获得组织均匀的接头, 同时可以降低工艺参数变化对接头质量的影响。焊接压力和温度对高温合金扩散焊接头力学性能的影响如图 7.4 所示。

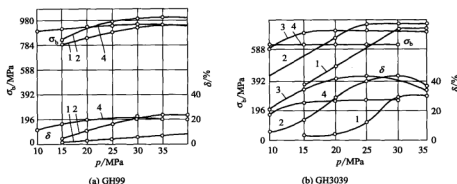


图 7.4 焊接压力和温度对高温合金扩散焊接头力学性能的影响

1—1000℃; 2—1150℃; 3—1175℃; 4—1200℃

同种材料加中间层扩散焊的工艺参数如表 7.8 所示。

表 7.8 同种材料加中间层扩散焊的工艺参数

序号	被焊材料	中间层	加热温度/℃	保温时间/min	压力/MPa	保护气氛/Pa
1	5A06 铝合金(LF6)	5A02(LF2)	500	60	3	50×10^{-3}
2	Al	Si	580	1	9.8	—
3	H62 黄铜	Ag+Au	400~500	20~30	0.5	—
4	1Cr18Ni9Ti	Ni	1000	60~90	17.3	1.33×10^{-2}
5	K18Ni 高温合金	Ni-Cr-B-Mo	1100	120	—	真空
6	GH141	Ni-Fe	1178	120	10.3	—
7	GH22	Ni	1158	240	0.7~3.5	—
8	GH188 钴基合金	97Ni-3Be	1100	30	10	—
9	Al_2O_3	Pt	1550	100	0.03	空气
10	95 陶瓷	Cu	1020	10	14~16	5×10^{-3}
11	SiC	Nb	1123~1790	600	7.26	真空
12	Mo	Ti	900	10~20	68~86	—
13	Mo	Ta	915	20	68.6	—
14	W	Nb	915	20	70	—

瞬间液相扩散焊的工艺参数有压力、温度、保温时间和中间层合金的厚度、真空度等。压力参数是以焊件结合面能良好地接触为目的,因此可以不加压力或施加较小的压力,往往是加静压力。温度和保温时间对接头质量影响很大,它取决于母材性能、中间层合金成分和熔化温度。对要求质量高、强度高的接头,应选择较高的焊接温度和较长的保温时间,使中间层合金与母材充分扩散,消除焊缝中 B、Si 的共晶组织。中间层合金的厚度以能形成均匀液态薄膜为宜,一般为 0.02~0.05mm。表 7.9 列出几种高温合金瞬间液相扩散焊的工艺参数。

表 7.9 高温合金瞬间液相扩散焊的工艺参数

合金牌号	中间层合金及厚度/mm	焊接温度/℃	焊接压力/MPa	保温时间/h
GH22	Ni 0.01	1158	0.7~3.5	4.0
DZ22	Z2F 0.04×2	1210	无	24
	Z2P 0.1	1210	无	24
DD3	D1P 0.01	1250	无	24

瞬间液相扩散焊的接头组织主要由 Ni-Cr 固溶体、 γ' 强化相组成,可能有 Si 或 B 的化合物,有时有少量共晶组织。由于组织与母材基本一致,接头力学性能较为理想,高温持久强度也较高(见表 7.10)。

表 7.10 高温合金瞬间液相扩散焊的接头性能

母材	中间层合金	接头间隙/mm	工艺参数	持久性能			断裂位置
				试验温度/℃	应力/MPa	持久寿命/h	
DZ22	Z2P	0.1	1210℃×36h	980	166	77.4	接头
						51.2	
	Z2F	0.08	1210℃×24h	980	166	129.2	接头
						203.0	
					186	80.3	接头
						116.6	
		1210℃×36h	980	166	166.0	接头	
DD3	D1F	0.08	1250℃×24h+870℃×24h	980	181	198.0	母材
						379.5	
			1250℃×36h+870℃×32h		203	137.0	母材
						124.0	

瞬间液相扩散焊主要用于焊接沉淀强化高温合金、单晶和定向的铸造高温合金以及镍-铝化合物基高温合金,如单晶和定向凝固的涡轮叶片、涡轮导向叶片等受力高温部件。

7.2.2 异种材料的扩散焊

当两种材料的冶金性能相差很大时,熔焊方法很难进行焊接,这时扩散焊就特别适用,它可以获得满意的接头。在确定某异种金属组合的扩散焊条件时,应考虑两种材料之间相互扩散的问题。

- 界面形成中间相或脆性金属间化合物。可通过选择合适的中间层来防止。
- 由于扩散而产生的金属迁移速度不同,而在紧邻扩散界面处产生多孔性。选择合适

的焊接条件或适宜的中间层,可以解决问题。

c. 两种金属的热膨胀系数差异大,在加热和冷却过程中产生较大的应力,工件变形大或内应力过大,甚至开裂。解决措施要针对零件的技术要求、材料、焊接条件等设计。

各种材料组合采用扩散焊的可能性见表 7.11。一些常用异种材料组合扩散焊的工艺参数如表 7.12 所示。

表 7.11 各种材料组合采用扩散焊的可能性

材料	Al	石墨	灰口铸铁	硬质合金	陶瓷	可伐合金	Cu	Mo	Ni	Nb	Ag	碳钢	高合金钢	Ti	W	锡青铜	Zr
Al	✓					✓	✓		✓			✓	✓				
石墨													✓	✓			
灰口铸铁			✓									✓					
硬质合金												✓					
陶瓷							✓							✓			
可伐合金	✓					✓	✓	✓	✓							✓	
Cu	✓				✓	✓	✓	✓	✓			✓		✓			✓
Mo						✓	✓	✓				✓	✓				
Ni	✓					✓	✓		✓					✓	✓		
Nb										✓							
Ag											✓						
碳钢	✓		✓	✓			✓	✓				✓					
高合金钢	✓	✓						✓					✓	✓			
Ti		✓			✓		✓		✓				✓				
W									✓						✓		
锡青铜						✓											
Zr							✓										✓

注:✓为焊接性良好(✓为同种金属焊接);空白为焊接性差或无报道数据。

表 7.12 一些常用异种材料组合扩散焊的工艺参数

被焊材料	中间层合金	加热温度/℃	保温时间/min	压力/MPa	保护气氛/Pa
Al+Cu	—	500	10	9.8	6.67×10^{-3}
Al+铜	—	460	1.5	1.9	1.33×10^{-2}
Al+Ni	—	450	4	15.4~36.2	—
Al+Zr	—	490	15	15.435	—
LF6(防锈钢)+不锈钢	—	550	15	13.7	1.33×10^{-2}
Mo+0.5Ti	Ti	915	20	70	—
Mo+Cu	—	900	10	72	—
Ti+Cu	—	860	15	4.9	—
Ti+不锈钢	—	770	10	—	—
Cu+低碳钢	—	850	10	4.9	—
可伐合金+青铜	—	950	10	6.8	1.33×10^{-3}
可伐合金+铜	—	850	10	4.9	—

续表

被焊材料	中间层合金	加热温度/℃	保温时间/min	压力/MPa	保护气氛/Pa
硬质合金+铜	—	1100	6	9.8	1.33×10^{-2}
不锈钢+铜	—	970	20	13.7	—
TAI(纯钛)+95 陶瓷	Al	900	20~30	9.8	$<1.33 \times 10^{-2}$
TC4 钛合金+1Cr18Ni9Ti	V+Cu	900~950	20~30	5~10	1.33×10^{-3}
95 陶瓷+Cu	—	950~970	15~20	7.8~11.8	6.67×10^{-3}
Al ₂ O ₃ 陶瓷+Cu	Al	580	10	19.6	—
Al ₂ O ₃ +ZrO ₂	Pt	1459	240	1	—
Al ₂ O ₃ +不锈钢	Al	550	30	50~100	—
Si ₃ N ₄ 陶瓷+铜	Al-Si	550	30	60	—
Cu+316 不锈钢	Cu	982	2	①	—
Cu+(Nb-1%Zr)	Nb-1%Zr	982	240	①	—
434 钢+Inconel 718	—	943	240	200	—
Ni200+ Inconel 500	—	927	180	6.9	—
(Nb-1%Zr)+316 不锈钢	Nb-1%Zr	982	240	①	—
Zr2+304 不锈钢	—	1021~1038	30	①	—
ZrO ₂ +不锈钢	Pt	1130	240	1	—
QCr0.8+高 Cr-Ni 合金	—	900	10	1	—
QSn10-10+低碳钢	—	720	10	4.9	—

① 焊接压力借助差动热膨胀夹具施加。

异种材料扩散焊的缺陷、产生的主要原因及防止措施列于表 7.13。

表 7.13 异种材料扩散焊的缺陷、产生的主要原因及防止措施

异种材料	焊接缺陷	缺陷产生的原因	防止措施
青铜+铸铁	青铜一侧产生裂纹, 铸铁一侧变形严重	扩散焊时加热温度、压力不合适	选择合适的焊接工艺参数, 焊接室中的真空度要合适
铜+铜	铜母材一侧结合强度差	加热温度不够, 压力不足, 焊接时间短, 接头装配位置不正确	提高加热温度、压力, 延长焊接时间, 接头装配合理
铜+铝	接头严重变形	加热温度过高, 压力过大, 焊接保温时间过长	加热温度、压力及保温时间应合理
金属+玻璃	接头贴合, 强度低	加热温度不够, 压力不足, 焊接保温时间短, 真空度低	提高焊接温度, 增加压力, 延长焊接保温时间, 提高真空度
金属+陶瓷	产生裂纹或剥离	线胀系数相差太大, 升温过快, 冷却太快, 压力过大, 加热时间过长	选择线胀系数相近的两种材料, 升温、冷却应均匀, 压力适当, 加热温度和保温时间适当
金属+半导体材料	错位、尺寸不合要求	夹具结构不正确, 接头安放位置不对, 工件震动	夹具结构合理, 接头安放位置正确, 周围无震动

(1) 钢与其他金属的扩散焊

① 钢与铝的扩散焊 钢与铝及铝合金进行真空扩散焊时, 在扩散焊界面附近容易形成 Fe-Al 金属间化合物, 会使接头强度下降。为了获得良好的扩散焊接头性能, 可采用增加中间过渡层的方法获得牢固的接头。中间过渡层可采用电镀等方法镀上很薄的一层金属, 一般

选用铜和镍。这是因为铜和镍能形成无限固溶体,镍与铁、镍与铝均能形成连续固溶体。这样就能有效地防止界面处出现 Fe-Al 金属间化合物,提高接头的性能。中间层的成分可根据合金状态图和界面接触区可能形成的新相进行选择。

低碳钢与防锈铝 LF21 (3A21) 进行真空扩散焊接时,可在低碳钢的表面上先镀一层铜,之后再镀一层镍。铜、镍中间层可用电镀法获得,焊接时采用氩气保护。低碳钢与防锈铝扩散焊的工艺参数为:加热温度 550℃,保温时间 5~20min,焊接压力 13.7MPa,真空度 1.33×10^{-4} Pa,可获得令人满意的焊接接头性能。

Q235 低碳钢与纯铝 L4 (1035) 扩散焊时,可在 Q235 低碳钢上镀上铜、镍复合镀层,采用如下工艺可获得良好的接头:加热温度 550℃,焊接压力 12.3MPa,焊接时间 2min,真空度 1.33×10^{-4} Pa。

焊接直径为 25~32mm 的纯铝 L2 (1060) 与 1Cr18Ni9Ti 不锈钢棒的扩散焊工艺参数为:加热温度 500℃,保温时间 30min,焊接压力 7.4MPa,真空度为 $1.33 \times 10^{-4} \sim 6.65 \times 10^{-5}$ Pa,焊后接头抗拉强度 $\sigma_b \geq 88.2$ MPa。在接头处形成了宽度 4~6 μ m 的过渡层,其显微硬度为 490~1372MH。

合金元素 Mg、Si 及 Cu 对铝与钢扩散焊接头的强度影响很大。Mg 会增加接头中形成金属间化合物的倾向,对焊接性不利。随着铝合金中 Mg 含量的增加,焊接接头强度明显降低。当铝合金含有 0.5%Cu、Si 含量小于 3%时,对铝合金与 1Cr18Ni9Ti 钢之间的扩散焊非常有利。由于铝合金中 Si 含量较高,能提高抗蠕变能力。所以扩散焊时须延长保温时间,才能获得最大的接头强度。

碳钢、不锈钢与铝及铝合金扩散焊的工艺参数见表 7.14。

表 7.14 碳钢、不锈钢与铝及铝合金扩散焊的工艺参数

异种金属	中间层	工艺参数			
		加热温度/℃	保温时间/min	压力/MPa	真空度/Pa
LF21(3A21)+镀镍 Q235 钢	Ni	550	2	13.72	1.33×10^{-2}
L4(1035)+Q235 钢	Ni	550	2	12.25	1.33×10^{-2}
L1(1070)+Q235 钢	Ni	350	5	2.19~2.45	1.33×10^{-2}
L1(1070)+Q235 钢	Ni	400~450	10~15	4.9~9.8	1.33×10^{-2}
L1(1070)+Q235 钢	Cu	450~500	15~20	19.5~29.4	1.33×10^{-2}
L4(1035)+1Cr18Ni9Ti	—	500	30	37.95	6.66×10^{-4}
L6(8A06)+1Cr18Ni9Ti	—	500	30	38.22	6.66×10^{-4}
W18Cr4V+45 钢	Ni	800	20	10	6.65×10^{-2}
12Cr18Ni10Ti+12Cr13	—	1050	20	10	$1.33 \times 10^{-2} \sim 6.65 \times 10^{-3}$

当铝合金中含有 3%Cu 时,可以提高接头的强度性能,这时在接头区域没有脆性相。1Cr18Ni9Ti 不锈钢与 Al-Cu 系合金扩散焊时,焊接加热温度不应超过 525℃。对 1Cr18Ni9Ti 不锈钢与 LF3 (5A03) 防锈铝扩散焊接头进行金相分析时发现,在扩散过渡区有两种显微硬度明显不同的相:比较硬的明亮相为金属间化合物 (600HB),相当于 Fe-Al 状态图的中间部分,即 FeAl₂ 或 Fe₂Al₅。接头抗拉强度约为 70MPa。电子探针分析表明,界面处发生了 Fe、Al、Ni、Cr 及 Mg 元素的扩散。

② 钢与铝的扩散焊 不锈钢 1Cr18Ni9Ti 和 1Cr13 与铝进行真空扩散焊时,能获得质量稳定的焊接接头。1Cr18Ni9Ti 不锈钢与铝扩散焊的工艺参数为:焊接温度 1000~1200℃,

保温时间 5~30min, 压力 5~20MPa, 真空度 10^{-3} Pa。

1Cr13 不锈钢与钼真空扩散焊的工艺参数为: 焊接温度 900~1000℃, 保温时间 15~20min, 压力 10~15MPa, 真空度 10^{-3} ~ 10^{-4} Pa。1Cr13 与钼的真空扩散焊接头强度可达 382.2~450.8MPa。

不锈钢与钼真空扩散焊时, 为了提高接头性能, 可以采用中间扩散层, 中间扩散层材料一般为镍或铜。采用镍或铜作为中间层的接头金属不产生金属间化合物, 接头塑性好、强度高。1Cr18Ni9Ti、1Cr13 与 Mo 真空扩散焊的工艺参数见表 7.15。

表 7.15 1Cr18Ni9Ti、1Cr13 与 Mo 真空扩散焊的工艺参数

异种金属	中间层材料	工艺参数			
		加热温度/℃	保温时间/min	压力/MPa	真空度/Pa
1Cr13+Mo	—	900~950	5~10	4.6~9.8	1.33×10^{-4}
1Cr13+Mo	Ni	1000~1050	15~20	11.7~19.6	1.33×10^{-4}
1Cr13+Mo	Ni	1100	25	24.5	1.33×10^{-4}
1Cr13+Mo	Ni	1200	14	4.6	1.33×10^{-4}
1Cr13+Mo	Cu	1200	5	4.6	1.33×10^{-4}
1Cr18Ni9Ti+Mo	—	900~950	5	4.6	1.33×10^{-4}
1Cr18Ni9Ti+Mo	Ni	1000~1100	5~10	4.6~7.8	1.33×10^{-4}
1Cr18Ni9Ti+Mo	Ni	1200	10~30	9.8~14.7	1.33×10^{-4}
1Cr18Ni9Ti+Mo	Cu	1200	30	19.0	1.33×10^{-4}

③ 钢与钛的扩散焊 采用真空扩散焊方法焊接钢与钛及钛合金时, 一般多采用中间扩散层或复合填充材料。中间层材料一般是 V、Nb、Ta、Mo、Cu 等, 复合层材料有: V+Cu、Cu+Ni、V+Cu+Ni 以及 Ta 和青铜等。

纯铁与纯钛 TA7 (Ti-5Al-2.5Sn) 真空扩散焊的工艺参数见表 7.16。几种不锈钢与纯钛 TA7 真空扩散焊的工艺参数见表 7.17。

表 7.16 纯铁与纯钛 TA7 (Ti-5Al-2.5Sn) 真空扩散焊的工艺参数

中间扩散层材料	工艺参数				备 注
	加热温度/℃	保温时间/min	压力/MPa	真空度/Pa	
Mo	800	10	10.39	1.33×10^{-5}	铁钼熔合线开裂
Mo	1000	20	17.25	1.33×10^{-5}	铁钼熔合线开裂
无	700	10	17.25	1.33×10^{-5}	接触面上硬度增高
无	1000	10	10.39	1.33×10^{-5}	纯铁侧硬度增高

④ 钢与铜的扩散焊 钢与铜及铜合金的扩散焊可以获得高质量的接头。焊接时, 由 Cu 溶于 Fe 中的 α 固溶体及 Fe 溶于 Cu 固溶体的混合物 (共晶体) 结晶而形成接头。焊接温度 750℃, 保温时间 20~30min 的扩散焊条件下, 通过金相分析可观察到共晶体。因此, 钢与铜真空扩散焊时要严格控制温度、时间等工艺参数, 使界面处形成的共晶体脆性相的厚度不超过 2~3 μ m, 否则整个焊接界面将变脆。

钢与铜真空扩散焊的工艺参数为: 焊接温度 900℃, 保温时间 20min, 焊接压力 5MPa, 真空度 1.33×10^{-2} ~ 1.33×10^{-3} Pa。

表 7.17 几种不锈钢与纯钛 TA7 真空扩散焊的工艺参数

异种金属	中间扩散层材料	工艺参数				备 注
		加热温度/℃	保温时间/min	压力/MPa	真空度/Pa	
Cr25Ni15+TA7	—	500	10~20	6.86~17.64	1.33×10^{-4}	接头有裂纹
Cr25Ni15+TA7	—	700	10~20	6.86~17.64	1.33×10^{-4}	钢与钛有 α 相
Cr25Ni15+TA7	Ta	900	10	8.82	1.33×10^{-4}	接头强度 $\sigma_b = 292.4 \text{ MPa}$
Cr25Ni15+TA7	Ta	1100	10	11.07	1.33×10^{-4}	有 TaFe ₂ 、NiTa
12Cr18Ni10Ti+TA7	—	900	15	0.98	1.33×10^{-5}	$\sigma_b = 274 \sim 323 \text{ MPa}$
12Cr18Ni10Ti+TA7	V	900	15	0.98	1.33×10^{-5}	$\sigma_b = 274 \sim 323 \text{ MPa}$
12Cr18Ni10Ti+TA7	V+Cu	900	15	0.98	1.33×10^{-5}	有金属间化合物
12Cr18Ni10Ti+TA7	V+Cu+Ni	1000	10~15	4.9	1.33×10^{-5}	有金属间化合物
12Cr18Ni10Ti+TA7	Cu+Ni	1000	10~15	4.9	1.33×10^{-5}	有金属间化合物

为了提高钢与铜及铜合金扩散焊接头的强度,可采用 Ni 作过渡层。Ni 与 Fe、Cu 都能形成无限连续固溶体。根据 Fe-Ni-Cu 平衡状态图, Ni 能大大提高 Fe 在 Cu 中或 Cu 在 Fe 中的溶解度,随后在低于 910℃ 时在 α 铁中形成有限溶解度的固溶体。当温度超过 910℃ 时,形成 Cu 在 γ 铁中的连续固溶体。在 750~850℃ 温度区间内,在 Fe 与 Ni 的接触面上形成共晶体膜,共晶体的组成为: Cu 在铁中和 Ni 与 Fe 在铜中固溶体的混合物。当温度为 900~950℃ 时,扩散过渡区形成无限连续的固溶体。当焊接温度大于 900℃,焊接时间大于 15min 时,形成与铜等强度的扩散焊接头。

⑤ 钢与铸铁的扩散焊 钢与铸铁的连接问题经常遇到。铸铁与钢、紫铜、黄铜、钛、陶瓷等的连接采用真空扩散焊效果较好。由于焊接温度较低,金属组织不会发生很大变化。焊接时还可通过调整工艺参数来改善接头区的显微组织和力学性能。钢与铸铁真空扩散焊的工艺参数见表 7.18。

表 7.18 钢与铸铁真空扩散焊的工艺参数

被焊材料	加热温度/℃	焊接时间/min	压力/MPa	真空度/Pa
HT15-32+45 钢	850	5~10	1.5	$1.33 \times 10^{-2} \sim 1.33 \times 10^{-3}$
HT21-40+50 钢	900	6~10	1.5	$1.33 \times 10^{-2} \sim 1.33 \times 10^{-3}$
HT15-32+1Cr18Ni9Ti	900	10	1.5	1.33×10^{-2}
KT30-6+1Cr18Ni9Ti	900	7~10	3.0	1.33×10^{-2}

(2) 铜与铝的扩散焊

铜和铝扩散焊时,影响接头质量和焊接过程稳定性的主要因素有加热温度、压力、焊接时间、真空度和焊件的表面状态等。扩散焊前焊件表面必须进行精细加工、磨平和清洗去油,使其表面尽可能光洁和无杂质。焊前须先去除铝材表面的氧化膜,真空度达到 $5 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 。

受铝熔点的限制,加热温度不能太高,否则母材晶粒长大,使接头强韧性降低。在 540℃ 以下 Cu/Al 扩散焊接头强度随加热温度的提高而增加,继续提高温度则使接头强韧性降低,因为在 565℃ 时形成 Al 与 Cu 的共晶体。

受铝的热物理性能的影响,压力不能太大。Cu/Al 扩散焊压力为 11.5MPa 可避免界面扩散空洞。延长保温时间到 25~30min 时,接头强度有显著的提高。

保温时间太短,铜、铝原子来不及进行充分扩散,无法形成牢固结合的扩散焊接头。但时间过长使Cu/Al界面过渡区晶粒长大,金属间化合物增厚,致使接头强韧性下降。在510~530℃的焊接温度下,扩散时间为60min时,接头界面结合较好。Cu/Al真空扩散焊工艺参数为:加热温度510~530℃,压力11.5MPa,保温时间60min。

用电子探针(EPMA)对Cu/Al扩散焊接头区的主要元素进行成分分析,结果表明,Al和Cu在加热温度510~530℃的扩散焊温度范围内相互扩散较为顺利,扩散过渡区宽度约为40 μ m,其中铜侧扩散区较厚(约为28.8 μ m),铝侧扩散区约11.8 μ m。这是因为Al原子活性比Cu强,Al向铜侧扩散进行较充分。

在高温下Al和Cu形成多种脆性的金属间化合物。温度为150℃时,在反应扩散的起始就形成CuAl₂;在350℃时出现化合物Cu₉Al₄的附加层;在400℃时,在CuAl₂与Cu₉Al₄之间出现CuAl层。当金属间化合物层的厚度达3~5 μ m时,扩散接头的抗拉强度明显降低。

熔化焊时,在Cu/Al接头的靠铜一侧易形成一层厚度为3~10 μ m的金属间化合物(CuAl₂),存在这样一个区域会使接头强韧性降低。只有在金属间化合物层的厚度小于1 μ m的情况下,才不会影响接头的强韧性。但是,Cu与Al扩散焊时,由于Cu与Al的相互扩散,在界面处形成不太厚的扩散层。扩散层具有细化的晶粒组织并夹带有金属间化合物层,因此显微硬度明显增高,但只要控制脆性区宽度不超过某限度,接头过渡区强韧性的降低是可以避免的,仍然可以满足扩散焊接头的使用要求。

铜和铝真空扩散焊的工艺参数应根据实际情况确定。对于电真空器件的零件,其工艺参数为:加热温度500~520℃,压力6.8~9.8MPa,焊接时间10~15min,真空度6.66 $\times 10^{-5}$ Pa。当焊接压力为9.8MPa时,扩散焊接头的合格率可达100%。

(3) 铜与钛、镍、钼的扩散焊

铜与钛的扩散焊有直接扩散焊和加中间过渡层的扩散焊,前者接头强度低,后者强度高,并有一定塑性。钛与铜之间不加中间层直接扩散焊时,为了避免金属间化合物的生成,焊接过程应在短时间内完成。TA2纯钛与铜的直接扩散焊的工艺参数是:焊接温度850℃,焊接时间10min,压力为4.9MPa,真空度 1.33×10^{-5} Pa。此温度虽低于产生共晶体的温度,但这种接头的强度并不高,低于铜的强度。

表面清洁对扩散焊的质量影响较大。焊前对铜件用三氯乙烯进行清洗,清除油脂,然后在10%的H₂SO₄溶液中浸蚀1min,再用蒸馏水洗涤。随后进行退火处理,退火温度为820~830℃,时间为10min。钛母材用三氯乙烯清洗后,在2%HF+50%HNO₃的水溶液中,用超声波振动浸蚀4min,以便清除氧化膜,然后再用水和酒精清洗干净。

在铜(T2)与钛(TC2)之间加入中间层钼和铌,使被焊金属间既不产生低熔点共晶,也不产生脆性的金属间化合物,焊接接头的性能会得到很大的提高。对铜和钛以焊接温度810℃ $\pm 10^\circ\text{C}$,焊接时间10min,真空度 $1.33 \times 10^{-4} \sim 5 \times 1.33 \times 10^{-6}$ Pa,压力为3.4~4.9MPa,进行过渡层扩散焊,接头力学性能见表7.19。

采用真空扩散焊方法焊接铜与镍的零件,是真空器件制造中应用较为广泛的一种焊接工艺。铜与镍及镍合金的真空扩散焊工艺参数见表7.20。

铜与钼之间不能互溶,铜-钼难以进行熔化焊。铜与钼的线胀系数相差悬殊,在焊接加热和冷却过程中会产生较大的热应力,焊接时容易产生裂纹。如果加入中间层金属镍,便可缓解热应力,同时镍与铜互溶,可获得质量良好的扩散焊接头。

以镍为中间层的铜与钼真空扩散焊的工艺参数见表7.21。

铜与钼扩散焊还可以采用镀层的方法。在钼表面镀上一层厚度为7~14 μ m的镍层,然后再进行正常的真空扩散焊,能获得强度较高的扩散焊接头。

表 7.19 TC2 与 T2、QCr0.8 扩散焊工艺参数及接头力学性能

中间材料	工艺参数			抗拉强度/MPa	加热方式
	加热温度/℃	保温时间/min	压力/MPa		
不加中间层	800	30	4.9	62.72	高频感应加热
	800	300	3.43	144.1~156.8	电炉加热
钼(喷涂)	950	30	4.9	78.4~112.7	高频感应加热
	980	300	3.43	186.2~215.6	电炉加热
镍(喷涂)	950	30	4.9	70.6~102.9	高频感应加热
	980	300	3.43	186.2~215.6	电炉加热
镍(0.1mm 箔片)	950	30	4.9	94.2	高频感应加热
	980	300	3.43	215.6~266.6	电炉加热

表 7.20 铜与镍及镍合金的真空扩散焊工艺参数

异种金属	接头形式	工艺参数			
		加热温度/℃	保温时间/min	压力/MPa	真空度/Pa
铜+镍	对接	400	20	9.80	1.33×10^{-4}
铜+镍	对接	900	20~30	12.7~14.7	6.67×10^{-5}
铜+镍合金	对接	900	15~20	11.76	1.33×10^{-5}
铜+可伐合金	对接	950	10	1.90	1.33×10^{-4}
铜+可伐合金	对接	950	10	6.86	6.67×10^{-5}

表 7.21 以镍为中间层的铜与钼真空扩散焊的工艺参数

加热温度/℃	保温时间/min	压力/MPa	真空度/Pa	加热温度/℃	保温时间/min	压力/MPa	真空度/Pa
800	10	14.7	1.33×10^{-4}	900	15	19.6	1.33×10^{-4}
850	15	19.6	1.33×10^{-5}	950	10	22.7	1.33×10^{-5}

(4) 钛与铝的扩散焊

为了消除 Ti 和 Al 表面的油脂和氧化膜,焊前先用 HF 去除氧化膜,用丙酮进行清洗,保持钛铝表面的紧密接触。钛与铝直接进行扩散焊,接头塑性和强度很低。可采用三种工艺进行 Ti-Al 扩散焊。

- ① Ti-Al 直接扩散焊(非常困难)。
- ② 先在 Ti 表面渗铝,然后与 Al 扩散焊。
- ③ Ti 和 Al 之间夹厚度为 0.4mm 的铝箔中间层。

钛与铝镁合金直接进行扩散焊时,接头的强度和塑性都很低,必须用工业纯铝作中间层。有两种方法,一是采用厚度不同的 L4 铝箔(1035),二是把钛表面浸入铝液熔池中镀铝或渗铝。钛与铝的扩散焊工艺参数为:加热温度 600~620℃,保温时间 60min,压力 7~12MPa,真空度 5×10^{-4} Pa。TA7 纯钛+LF3 防锈铝(5A03)扩散焊的工艺参数和接头抗拉强度见表 7.22。

钛表面渗铝后的 Ti/Al 扩散焊界面随着 Ti、Al 原子的相互渗入,钛表面渗铝层的相结构发生了变化,生成了 Ti/Al 固溶体和 Ti-Al 金属间化合物。渗铝层中虽然还有形如链粒状的共晶组织,但由于 Ti 原子的渗入,相结构与 Al 基体或 Ti 基体不同。

表 7.22 TA7 纯钛与防锈铝扩散焊的工艺参数及接头性能

镀铝工艺参数		中间层		工艺参数		抗拉强度/MPa	破断部位
温度/℃	时间/s	厚度/mm	材料	温度/℃	时间/s		
780~820	35~70	—	—	520~540	30	202~224(214)	镀层上, LF3 上
—	—	0.4	L4(1035)	520~550	60	182~191(185)	L4 中间层上
—	—	0.2	L4(1035)	520~550	60	216~233(225)	L4 中间层上, LF3 上

注: 括号中的数据为平均值。

钛侧过渡区、渗铝结合界面和 Al 侧过渡区共同组成了 Ti/Al 扩散焊接头的扩散过渡区。扩散过渡区中从钛侧到铝侧 Ti 含量的浓度逐渐降低, 形成的产物也不同。扩散过渡区中 Al 含量为 36% 时, 形成 γ 相的 TiAl 型金属间化合物; Al 含量为 60%~64% 时, 生成 TiAl₃ 型金属间化合物。

钛侧过渡区是白亮的 TiAl₃、TiAl 金属间化合物和 Ti 溶入铝中形成的 α -Al (Ti) 固溶体, 是在渗铝和扩散焊时 Ti、Al 原子相互扩散的结果。 α -Al (Ti) 固溶体是呈等轴状分布的 α 相, TiAl₃ 和 TiAl 是脆硬的金属间化合物, 使扩散过渡区的显微硬度提高。

7.2.3 金属间化合物的扩散焊

这类材料较脆, 熔焊时易产生裂纹, 可采用扩散焊。如 Ti₃Al、Fe₃Al 合金可用真空扩散焊方法焊接, 可获得满意的接头性能。而 Ni₃Al 合金可用瞬间液相扩散焊方法焊接。

用扩散焊连接 Ti-Al48-Cr2-Nb2 合金也获得成功。在 1473K、3.84ks、15MPa 和 2.6×10^{-2} Pa 真空条件下, 用扩散焊连接 Ti-Al38 合金可以获得无缺陷的接头。扩散接头的室温抗拉强度约为 225MPa, 断于母材。但在 1073K 和 1273K 温度下拉伸接头断于连接界面, 接头抗拉强度比母材低约 40MPa (见图 7.5)。分析原因认为界面处元素的扩散迁移较少, 形成平坦的断裂表面。为了促进界面扩散, 改善 1273K 时的接头抗拉强度, 可对扩散接头进行再结晶热处理。经过再结晶热处理后, 1273K 时的接头抗拉强度增加到 210MPa, 断裂在母材区。

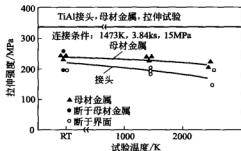


图 7.5 不同温度下 TiAl 接头和母材的抗拉强度
(焊接条件: 1473K, 3.84ks, 15MPa 和 2.6×10^{-2} Pa 真空度)

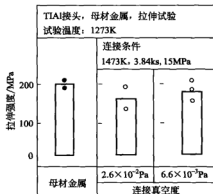


图 7.6 真空度对 TiAl 接头抗拉强度的影响

真空度对 1273K 时扩散焊接头抗拉强度的影响见图 7.6。显见, 提高真空度有利于改善扩散焊接头的高温强度。

用 Al 箔作为填充金属可以用扩散焊成功地连接 TiAl 合金。试验母材为具有 ($\gamma + \alpha_2$)

层片状组织的 Ti-Al34 铸造合金, 连接温度为 1173K。在此温度下 Al 填充材料熔化后与母材反应形成 $TiAl_3$ 和 $TiAl_2$, 接着在 1573K 进行均匀化处理, 使填充金属转变为单相 γ 。所得接头具有几乎与母材相同的室温和 873K 时的抗拉强度 (220MPa)。

采用扩散焊连接 Fe_3Al 合金时, 加热温度是关键因素。当温度越高时, 金属原子扩散所需要的能量越高, 从而界面间原子相互扩散越充分, 接头结合强度越高。但是由于 Fe、Al 冶金物理特性方面的限制, 加热温度太高, 母材晶粒长大、中间金属间化合物不断加厚使接头强度降低。

压力越大、温度越高, 界面处紧密接触的面积也越大, 压力小产生界面孔洞, 阻碍晶粒生长和原子穿越界面的扩散迁移。由于铁、铝原子具有不同的扩散速度, 造成了通过界面向其两侧扩散迁移的原子数量不等, 产生 Kirkendall 效应即扩散空洞。

保温时间决定着 Fe_3Al 合金中 Al、Fe 原子扩散的均匀化程度, 保温时间越长, 原子可以进行均匀充分的扩散, 而使接头强度增加。时间太短, 原子来不及进行充分扩散, 无法形成高强度的接头。但是, 保温时间过长会使过渡区晶粒长大, 金属间化合物增厚, 致使接头强度下降。

采用真空扩散焊工艺, 经过图 7.7 所示的焊接工艺参数可以获得良好的 Fe_3Al 合金与 Q235 低碳钢的扩散焊接头。

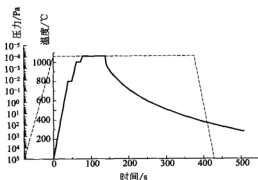


图 7.7 Fe_3Al 与 Q235 钢真空扩散焊的工艺参数

Fe_3Al 一侧的显微组织越过扩散过渡区向 Q235 一侧连续地延展, 扩散过渡界面呈镶嵌状互相交错。在过渡区靠 Fe_3Al 一侧, 柱状晶晶粒较粗大, 显微组织大多为等轴晶。在 Q235 钢一侧, 由于 Al 元素的扩散过渡, 使过渡区靠 Q235 一侧的铁素体晶粒也较粗大, 并且由于 Al 为铁素体化元素, 过渡区附近几乎全部为铁素体。

扫描电镜 (SEM) 观察表明, 在靠近 Fe_3Al 侧的过渡区中有第二相析出, 析出物的分布形态各异, 大多沿晶界呈不连续状分布。根据 Al 含量的不同, 可以形成一系列的 Fe-Al 金属间化合物。Al 含量 13.9%~20% 形成超点阵结构的 Fe_3Al , Al 含量 20%~36% 时形成 $FeAl$ 。 $Fe-Al$ 系合金可能形成的金属间化合物的显微硬度见表 7.23。

表 7.23 $Fe-Al$ 系金属间化合物的显微硬度和铝含量

化合物	铝含量(原子分数)/%		显微硬度(HM)
	相图中数据	化学分析数据	
Fe_3Al	13.87	14.04	350
$FeAl$	32.57	33.64	640
$FeAl_2$	49.13	49.32	1030
Fe_2Al_5	54.71	54.92	820
$FeAl_3$	59.18	59.40	990
Fe_7Al_{17}	62.93	63.32	1080

Fe_3Al 基体、过渡区及 Q235 基体扩散焊接头不同区域显微硬度测定结果 (见图 7.8) 表明, 过渡区界面靠 Q235 钢一侧的显微硬度较低 (300~380HM), 而界面靠 Fe_3Al 一侧扩

散过渡区的显微硬度明显增高 (470~530HM), 但与 Fe_3Al 基体显微硬度 ($\geq 500\text{HM}$) 相比仍偏低。显见, $\text{Fe}_3\text{Al}/\text{Q235}$ 界面过渡区中未出现明显的高硬度脆性相 (如 FeAl_2 、 Fe_2Al_5 、 FeAl_3 、 Fe_2Al_7 等), 并且通过对过渡区进行电子探针分析也得到了证实 (见表 7.24)。这种显微硬度特性决定了 $\text{Fe}_3\text{Al}/\text{Q235}$ 扩散接头具有良好的室温拉伸性能, 可以有效提高结合界面的韧性, 防止焊接裂纹的产生。

X 射线衍射试验结果表明, $\text{Fe}_3\text{Al}/\text{Q235}$ 扩散过渡区主要由 Fe_3Al 相和 $\alpha\text{-Fe}$ (Al) 固溶体构成, 存在少量的 FeAl 相, 但不存在含铝更高的 Fe-Al 脆性相 (见图 7.9 和图 7.10), 这种相组成对提高 $\text{Fe}_3\text{Al}/\text{Q235}$ 扩散界面的韧性和抗裂纹能力是有利的。这些相是由亚晶粒结构组成, 没有发现显微孔洞、裂纹等微观缺陷。这表明 $\text{Fe}_3\text{Al}/\text{Q235}$ 异种材料扩散过渡区的结合比较紧密, 有利于提高 $\text{Fe}_3\text{Al}/\text{Q235}$ 扩散焊过渡区的韧性和抗裂性能。

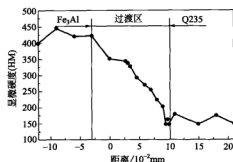


图 7.8 $\text{Fe}_3\text{Al}/\text{Q235}$ 异种材料扩散结合界面附近的显微硬度

表 7.24 $\text{Fe}_3\text{Al}/\text{Q235}$ 扩散过渡区电子探针成分分析 (原子分数)

位置	No.	Fe	Al	C	Cr	Mn	Si
Fe_3Al 基体	1	82.6	16.6	0.14	1.02	0.15	0.18
	2	82.7	16.3	0.13	0.99	0.15	0.22
	3	81.9	17.2	0.13	1.01	0.13	0.20
	4	82.0	16.9	0.13	0.94	0.18	0.20
第二相析出物	5	74.66	14.31	0.65	1.18	0.21	0.07
	6	77.90	15.90	0.61	1.18	0.23	0.10
	7	77.04	15.45	0.50	1.32	0.23	0.10
	8	78.77	13.10	0.22	1.26	0.20	0.06

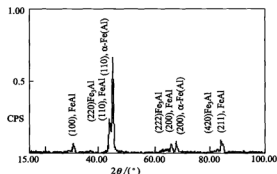
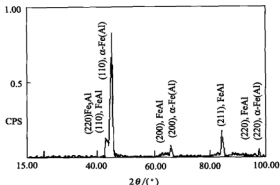


图 7.9 $\text{Fe}_3\text{Al}/\text{Q235}$ 扩散界面靠 Fe_3Al 侧的 X 射线衍射图

铝含量大于 40% 的 FeAl 合金室温下由于有序合金交滑移困难导致的内部应力集中以及杂质在晶界的偏聚, 使得晶界弱化, 晶内键结合性差。与 Fe_3Al 合金相比, FeAl 合金表现为沿晶断裂和穿晶解理断裂, 表现出很差的室温塑性, 在焊接性方面远不如 Fe_3Al 合金。

图 7.10 Fe₃Al/Q235 扩散界面靠 Q235 侧的 X 射线衍射图

7.2.4 复合材料的扩散焊

(1) 连续纤维增强金属基复合材料

扩散焊过程中工件处于固态，避免了熔化金属对纤维的侵蚀作用，因此扩散焊被认为是纤维增强金属基复合材料的有效焊接方法之一。但纤维增强金属基复合材料扩散焊时仍存在问题，主要有如下方面。

a. 由于扩散焊加热时间长，纤维与基体之间可能会发生相互作用。

b. 焊接面上的高强度和高刚度纤维相互接触时阻碍了焊接面的变形和紧密接触，使扩散结合难以实现。

c. 复合材料与其基体金属扩散焊时，基体金属一侧的变形过大。

d. 纤维增强金属基复合材料扩散焊接头的强度主要取决于结合面上复合材料基体之间的结合强度。基体金属在焊接界面上所占的百分比越大，接头的强度越高；反之，纤维所占百分比越大，接头的强度越低。也就是说，复合材料中纤维体积分数越大，其焊接性越差。

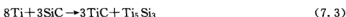
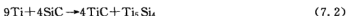
① 加热温度及保温时间 扩散焊加热温度及保温时间应确保不发生明显的界面反应。下面以 SiC_f/Ti-6Al-4V 复合材料的扩散焊为例，讨论焊接参数的选择原则。SiC_f 是一种专门用于增强钛基复合材料的碳化硅纤维，直径约 140μm，表面有一层 3μm 厚的富碳层。

图 7.11 为不同温度下 SiC_f/Ti-6Al-4V 复合材料界面反应层厚度与加热时间的关系。可以看出，加热温度越高，反应层的增大速度越快，但加热到一定时间后，反应层厚度增大速度变慢。可见，SiC 纤维与钛合金基体之间的反应分两个阶段。

根据热力学分析，高温下 SiC 纤维与钛合金基体之间最容易发生的反应是：



这是第一阶段发生的反应，该反应依赖于 Ti 或 C 的扩散。由于 C 在 TiC 中的扩散比 Ti 要快得多，因此 C 不断地穿过生成的 TiC 层向外扩散，并与钛基体进一步发生反应，直至表面富碳层完全耗尽。然后进行自由能变化较小的两个反应：



这是第二阶段的反应。其反应物为两种硅化物和 TiC。进行这两个反应时，Ti 必须首先穿过一定厚度的反应层才能与 SiC 发生反应，由于反应层已较厚，而且 Ti 的扩散速度较慢，因此，这两个反应的反应速度比较慢。

当反应层的厚度超过 1μm 时，SiC_f/Ti-6Al-4V 复合材料的抗拉强度显著下降。图 7.12

给出了不同温度下反应层达到 $1\mu\text{m}$ 时所需的时间。SiC₄/Ti-6Al-4V 复合材料进行扩散焊时, 焊接温度和保温时间所构成的点位于图 7.12 所示的曲线下。

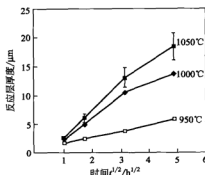


图 7.11 SiC₄/Ti-6Al-4V 复合材料界面
反应层厚度与加热时间的关系

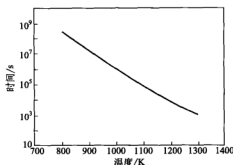


图 7.12 不同温度下反应层
达到 $1\mu\text{m}$ 时所需的时间

② 中间层及焊接压力 SiC₄/Ti-6Al-4V 复合材料与钛合金 Ti-6Al-4V 之间的异种材料焊接时, 对接界面上不存在纤维的直接接触, 易于发生塑性流变, 因此直接扩散焊及瞬间液相扩散焊均能较容易地实现。但是直接扩散焊时所需的压力仍较大, Ti 合金一侧的变形过大; 而采用瞬时液相扩散焊时, 所需的焊接压力较低, 钛合金一侧的变形也较小。

例如, 为使接头强度达到 850MPa, 直接扩散焊所需的焊接压力为 7MPa, 焊接时间为 10.8ks; 而采用 Ti-Cu-Zr 作中间层进行瞬间液相扩散焊时, 所需的焊接压力仅为 1MPa, 焊接时间为 1.8ks。同时钛合金一侧的变形量也由直接扩散焊时的 5% 降到瞬间液相扩散焊时的 2%。

纤维增强金属基复合材料的直接扩散焊是非常困难的, 这是因为焊接界面上的高强度、高刚度纤维相互接触, 阻碍了焊接面的紧密接触和局部塑性变形。因此, 应在被焊接的复合材料中间插入中间层, 使焊接面上避免出现纤维与纤维的直接接触。

图 7.13 示出用 Ti-6Al-4V 中间层、用 Ti-Cu-Zr 作瞬间液相层时 SiC₄/Ti-6Al-4V 复合材料的瞬间液相扩散焊示意图。图 7.14 为 Ti-6Al-4V 钛合金中间层厚度与 SiC₄-30%/Ti-6Al-4V 复合材料接头强度之间的关系。由图可见, 当中间层厚度超过 $80\mu\text{m}$ 时复合材料接头的抗拉强度达到了 850MPa, 等于 SiC₄-30%/Ti-6Al-4V 复合材料与 Ti-6Al-4V 钛合金之间的接头强度。事实上, Ti-6Al-4V 中间层达到一定厚度时, 复合材料的焊接变成了 SiC₄/Ti-6Al-4V 复合材料与 Ti-6Al-4V 钛合金的焊接, 不同的是要同时焊接两个异种材料接头。

当中间层厚度达到 $80\mu\text{m}$ 后, 再增加中间层的厚度, SiC₄/Ti-6Al-4V 复合材料接头的强度不再增大。这是由于接头的强度由基体金属间的结合强度控制, 当中间层厚度达到 $80\mu\text{m}$ 后, 基体金属间的结合已达到最佳状态, 再增加厚度时基体金属的结合状态不再发生变化。

③ 接头的优化设计 焊接接头形式对接头强度具有重要的影响。为了提高纤维增强金属基复合材料的接头强度, 可将接头形式设计成斜口接头, 图 7.15 为加中间层的复合材料扩散焊斜口接头示意图。接头强度系数大约为 80% 时, 断裂起始于接头表面上 SiC 纤维不连续的位置 (图 7.16 中的 A 点), 起裂后裂纹沿垂直于拉伸方向扩展, 穿过整个复合材料断面。接头强度未达到复合材料基体强度的原因是由于接头表层纤维的不连续性, 表层纤维的增强作用大大降低, 在较低的应力下就萌生裂纹。

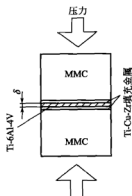


图 7.13 同时利用中间层及瞬间液相层的焊接方法

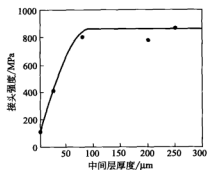


图 7.14 中间层厚度对 $\text{SiC}_f\text{-}30\%/\text{Ti-}6\text{Al-}4\text{V}$ 复合材料瞬间液相扩散焊接头强度的影响

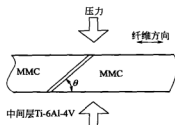


图 7.15 加中间层的 $\text{SiC}_f\text{-}30\%/\text{Ti-}6\text{Al-}4\text{V}$ 扩散焊斜口接头示意图

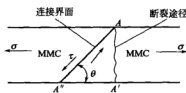


图 7.16 $\text{SiC}_f\text{-}30\%/\text{Ti-}6\text{Al-}4\text{V}$ 扩散焊斜口接头断裂过程示意图

(2) 非连续纤维增强金属基复合材料

由于 Al 表面存在一层稳定而牢固的氧化膜，阻碍了焊接表面之间的扩散结合。因此 Al 基复合材料的直接扩散焊是很困难的，需要较高的温度、压力及真空度。但加中间层后，不但可在较低的温度和较小的压力下实现其扩散焊接，而且可将原来结合界面上的增强相-增强相 (P-P) 接触改变为增强相-基体 (P-M) 接触，如图 7.17 所示，提高了接头强度。

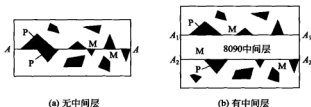


图 7.17 加中间层前后的界面结合情况

这是由于 P-P 几乎无法结合，而 P-M 间可形成良好的结合，使接头强度大大提高。根据所选用的中间层，扩散焊方法有两种：采用中间层的固态扩散焊及瞬间液相扩散焊。

① 采用中间层的固态扩散焊 这种方法的关键是选择中间层，选择中间层的原则是，中间层能够在较小的变形下去除氧化膜，易于发生塑性流变，且与基体金属及增强相不发生不利的相互作用。可用作中间扩散层的金属及合金有 Al-Li 合金、Al-Cu 合金、Al-Mg、Al-

Cu-Mg 及纯 Ag 等。

Li 具有较高的活性, 与 Al_2O_3 能反应生成一些比 Al_2O_3 易破碎或较易溶解的氧化物 Li_2O 、 LiAlO_2 、 LiAl_3O_5 等, 因此, Al-Li 合金具有通过化学机制破碎氧化膜的作用。用 Al-Li 合金作中间层焊接 $\text{SiC}_w/2124\text{Al}$ 时, 在较低的变形量 ($<20\%$) 下就能得到强度较高 (70.7MPa) 的接头。

Al-Cu 合金对基体 Al 的润湿性较差, 接头只有在较大的变形量 ($>40\%$) 下才能有较高的强度。因为用这种材料作中间层时, 结合界面上氧化膜的破坏完全是靠塑性流变的机械作用。在中等变形 ($20\%\sim 30\%$) 的焊接条件下, 氧化膜很难有效去除, 所得接头的抗剪强度很低。

Ag 作中间层时, 焊缝与母材的界面上会形成一层稳定的金属间化合物 δ 相, δ 相的形成有利于破碎氧化膜, 促进焊接界面的结合。但 δ 相含量较大时, 特别是当形成连续的 δ 层时, 接头将大大脆化, 且强度降低。当中间扩散层足够薄时 ($2\sim 3\mu\text{m}$), 可防止形成连续的金属间化合物, 接头的强度仍较高。例如, 将焊接表面镀上 $3\mu\text{m}$ 的一层 Ag 时进行扩散焊 ($470\sim 530^\circ\text{C}$, $1.5\sim 6\text{MPa}$, 60min), 得到的接头抗剪切强度为 30MPa。

破坏界面氧化膜的机制有两种: 一是机械机制, 二是化学机制。仅靠机械机制, 如采用超塑性 Al-Cu 合金作中间层时, 工件的结合界面上的变形很大, 难以用于实际产品的焊接中。化学机制太强时, 可能会产生对接头性能不利的脆性相, 例如, 利用 Ag 作中间层时, 如果厚度超过 $3\mu\text{m}$, 将形成连续分布的脆性金属间化合物, 使接头强度降低。因此, 理想的破除氧化膜的方式是这两种机制的结合。

② 瞬间液相扩散焊接 由于粒子增强型金属基复合材料中存在大量的位错、亚晶界、晶界及相界面, 中间扩散层沿这些区域扩散时可大大缩短扩散时间, 因此这种材料的瞬间液相扩散焊要比基体金属更容易。例如, 用 Ga 作中间扩散层焊接 SiC_p/Al 时, 在 423K 的温度下进行焊接时所需的焊接时间小于时效时间, 因此焊接可以与时效同时进行。

a. 中间层的选择 瞬间液相扩散焊的中间层材料选择原则是, 应能与复合材料中的基体金属生成低熔点共晶或者熔点低于基体金属的合金, 易于扩散到基体中并均匀化, 且不能生成对接头性能不利的产物。

Al 基复合材料的瞬间液相扩散焊时可用作中间层的金属有 Ag、Cu、Mg、Ge、Zn 及 Ga 等, 可用作中间层的合金有: BAlSi、Al-Cu、Al-Mg 及 Al-Cu-Mg 等。利用 Ag、Cu 等金属作中间层时, 共晶反应时焊接界面处的基体金属要发生熔化, 重新凝固时增强相被凝固界面所推移, 增强相聚集在结合面上, 降低了接头强度。因此, 应严格控制焊接时间及中间层的厚度。而利用合金作中间层时, 只要加热到合金的熔点以上就可形成瞬间液相, 不需要在焊接过程中通过中间层和母材之间的相互扩散来形成瞬间液相, 基体金属熔化较轻, 可避免颗粒的偏聚问题。

表 7.25 为用不同中间层焊接的 $(\text{Al}_2\text{O}_3)_p-15\%/6061\text{Al}$ 复合材料接头的强度及工艺参数。用 Ag 与 BAlSi-4 作中间层时能获得较高的接头强度。用 Cu 作中间层时对焊接温度敏感, 接头强度不稳定。这与焊接界面上 Al_2O_3 偏聚及存在一些孔洞有关。

中间层厚度太薄时, 瞬间液相不能去除焊接界面上的氧化膜, 不能充分润湿焊接界面上的基体金属, 甚至无法避免 P-P 接触界面, 因此接头强度不高。中间层太厚时, 可能会形成对接头性能不利的金属间化合物, 也限制了接头强度的提高。

表 7.26 为用不同中间层焊接的 $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{sf}-15\%/6063\text{Al}$ 复合材料接头的强度及工艺参数。不加中间层时, 尽管也能得到强度较高的接头, 但工艺参数的选择范围非常窄。而用 Cu、2027Al 或 Ag 中间层时, 在宽广的工艺参数范围内均能得到接近母材性能的接头。

表 7.25 用不同中间层焊接的 $(\text{Al}_2\text{O}_3)_p-15\%/6061\text{Al}$ 复合材料接头的强度及工艺参数

中间层		工艺参数			强度/MPa		
材质	厚度/ μm	温度/ $^{\circ}\text{C}$	压力/MPa	时间/s	剪切强度	屈服强度	抗拉强度
$(\text{Al}_2\text{O}_3)_p-15\%/6061\text{Al}$ (母材)		—	—	—	—	317	358
Ag	25	580	—	130	193	323	341
Cu	25	565	—	130	186	85	93
BAISi-4	125	585	—	20	193	321	326
Sn-5Ag	125	575	—	70	100	—	—

表 7.26 用不同中间层焊接的 $(\text{Al}_2\text{O}_3)_s-15\%/6063\text{Al}$ 复合材料接头的强度及工艺参数

中间层		工艺参数			抗拉强度/MPa	断裂位置
材质	厚度/ μm	温度/ $^{\circ}\text{C}$	压力/MPa	时间/s		
无	—	873	2	—	98 97	—
Ag	16	873	2	1800 1800	188 145	焊接界面
Cu	5	883	1	1800	125	焊接界面
		873	2	1800 1800	179 181	母材 焊接界面
			1	1800	162	焊接界面
		823	1	1800	119	焊接界面
Al-Cu-Mg(A2017)	75	883	1	1800	161	焊接界面
		873	2	1800 1800	184 181	母材
			1	1800	173	焊接界面
Al-Cu-Mg(A2017)	30	883	1	1800	177	焊接界面
		873	2	1800	187	焊接界面

b. 加热温度和保温时间 Ag、Cu、Mg、Ge、Zn 及 Ga 与 Al 形成共晶的温度分别为 839K、820K、711K、697K、655K 及 420K。用这些金属作中间层时，瞬间液相扩散焊的焊接温度应超过其共晶温度，否则就不是瞬间液相焊，而是加中间层的固态扩散焊。同样，利用 BAISi、Al-Cu、Al-Mg 及 Al-Cu-Mg 合金作中间层时，焊接温度应超过这些合金的熔点。焊接时温度不宜太高，在保证出现焊接所需液相的条件下，尽量采用较低的温度，以防止高温对增强相的不利作用。从表 7.26 可以看出，在同样条件下，温度过高时，强度反而下降。

保温时间是影响接头性能的重要参数。时间过短时，中间层来不及扩散，结合面上残留较厚的中间层，限制了接头抗拉强度的提高。随着保温时间的增长，残余中间层逐渐减少，强度逐渐增加。当保温时间增长到一定程度时，中间层基本消失，接头强度达到最大。继续增加保温时间时，接头强度不但不再提高，反而降低，这是因为保温时间过长时，热循环对复合材料的性能具有不利的影响。

例如，用 0.1mm 厚的 Ag 作中间层，在加热温度 580 $^{\circ}\text{C}$ 、压力 0.5MPa 的条件下焊接 $(\text{Al}_2\text{O}_3)_s-30\%/ \text{Al}$ 复合材料。当保温时间为 20s 时，接头中间残留较多的中间层，接头的抗拉强度约为 56MPa；当保温时间为 100s 时，抗拉强度达到最高值，约 95MPa。当保温时间为 240s 时，接头的抗拉强度降到 72MPa 左右。

c. 焊接压力 瞬间液相扩散焊时，压力太小时塑性变形小，焊接界面与中间层不能达到

紧密接触,接头中会产生未焊合的孔洞,降低接头强度。压力过高时可将液态金属自结合界面处挤出,造成增强相偏聚,液相不能充分润湿增强相,也会形成孔洞。例如,用0.1mm厚的Ag作中间层,在加热温度580℃下焊接 $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{af}}-30\%/\text{Al}$ 时,压力小于0.5MPa及压力达到1MPa时,结合界面上均存在明显的孔洞,接头强度较低。在1MPa、120s条件下焊接的接头强度小于60MPa,而在0.5MPa、120s条件下焊接的接头抗拉强度约为90MPa。

d. 焊接表面的处理方式 表面的处理方式对接头性能具有很大的影响,比较电解抛光、机械切削以及用钢丝刷刷三种处理方式对 $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{af}}/\text{Al}$ 接头性能的影响,发现利用电解抛光处理时接头强度最高,利用钢丝刷刷时接头强度最低。这是因为用后两种方法处理时,被焊接面上堆积了一些细小的 Al_2O_3 碎屑,这些碎屑阻碍了基体表面的紧密接触。

电解抛光时,被焊接表面上不存在 Al_2O_3 碎屑,但纤维会露出基体表面。电解抛光时间对接头的强度影响很大,电解抛光时间太长时,纤维露头变长,焊接时在压力的作用下断裂,阻碍基体金属接触,降低接头的性能。

7.2.5 陶瓷与金属的扩散焊接

陶瓷与金属可以采用扩散焊的方法实现连接,其中以陶瓷与铜的扩散焊接研究得比较多,应用也比较广泛。陶瓷材料扩散焊的方法有以下几种。

- a. 同种陶瓷材料直接连接。
- b. 用另一种薄层材料连接同种陶瓷材料。
- c. 异种陶瓷材料直接连接。
- d. 用第三种薄层材料连接异种陶瓷材料。

陶瓷材料扩散焊的特点主要是:连接强度高,适合于连接异种材料。主要不足是扩散温度高、时间长且在真空中连接,设备昂贵、成本高,试件尺寸和形状受到限制。

(1) 主要工艺参数

陶瓷与金属的扩散焊既可在真空中,也可在氢气气氛中进行。通常金属表面有氧化膜时更易产生相互间的化学作用。因此在焊接真空中充以还原性的活性介质(使金属表面仍保持一层薄的氧化膜)会使扩散焊接头具有更高的强度。

氧化铝陶瓷与无氧铜之间的扩散焊接温度只要达到900℃就可得到合格的接头强度。更高的强度指标要在1030~1050℃焊接温度下才能获得,因为此时铜具有很大的塑性,易在压力下产生变形,使实际接触面增大。影响陶瓷与金属扩散焊接头强度的主要因素是加热温度、保温时间、施加的压力、环境介质、被连接面的表面状态以及被连接材料之间的化学反应和物理性能(如线胀系数)的匹配。

① 加热温度 加热温度对扩散过程的影响最显著,连接金属与陶瓷时温度一般达到金属熔点的90%以上。固相扩散焊时,元素之间相互扩散引起的化学反应,可以形成足够的界面结合。反应层的厚度(X)可以通过下式估算:

$$X = K_0 t^n \exp(-Q/RT) \quad (7.4)$$

式中, K_0 是常数; t 是连接时间; n 是时间指数; Q 是扩散激活能,取决于扩散机制; T 是热力学温度; R 是气体常数。

加热温度对接头强度的影响也有同样的趋势,根据拉伸试验得到的温度对接头抗拉强度(σ_b)的影响可以用下式表示:

$$\sigma_b = B_0 \exp(-Q_{\text{app}}/RT) \quad (7.5)$$

式中, B_0 是常数; Q_{app} 是表观激活能,可以是各种激活能的总和。

加热温度提高,使接头强度提高,用0.5mm厚度的铝作中间层连接铜与氧化铝陶瓷时,接头抗拉强度与连接温度之间的关系如图7.18所示。但是,温度提高可能使陶瓷的性

能发生变化,或出现脆性相而使接头性能降低。陶瓷与金属接头的抗拉强度与金属的熔点有关,在氧化铝陶瓷与金属的接头中,金属熔点提高,接头抗拉强度增大。

② 保温时间 SiC/Nb 接头中反应层厚度与保温时间的关系如图 7.19 所示。

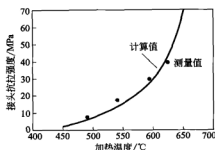


图 7.18 Al_2O_3 /钢扩散焊接头
抗拉强度与加热温度的关系

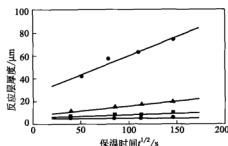


图 7.19 SiC/Nb 接头中反应层
厚度与保温时间的关系

保温时间对扩散焊接头强度的影响也有同样的趋势,抗拉强度(σ_b)与保温时间(t)的关系为: $\sigma_b = B_0 t^{1/2}$, 其中 B_0 为常数。但是,在一定试验温度下,保温时间存在一个最佳值。 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 扩散焊接头中,保温时间对接头抗拉强度的影响如图 7.20 所示。用 Nb 作中间层扩散连接 SiC/SUS304 时,时间过长后出现了强度降低、线胀系数与 SiC 相差很大的 NbSi_2 相,而使接头抗剪强度降低(见图 7.21)。用 V 作中间层连接 AlN 时,保温时间过长后也由于 V_5Al_8 脆性相的出现而使接头抗剪强度降低。

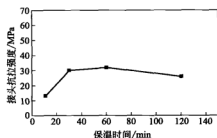


图 7.20 保温时间对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 扩散
焊接头抗拉强度的影响

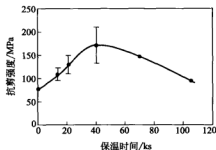


图 7.21 保温时间对 SiC/Nb/SiC
接头抗剪强度的影响

③ 压力 扩散焊过程中施加压力是为了使接触面处产生塑性变形,减小表面不平整和破坏表面氧化膜,增加表面接触,为原子扩散提供条件。为了防止构件发生大的变形,扩散焊时所加的压力一般较小,为 $0 \sim 100\text{MPa}$,这一压力范围通常足以减小表面不平整和破坏表面氧化膜,增加表面接触。

压力较小时,增大压力可以使接头强度提高,如用 Cu 或 Ag 连接 Al_2O_3 陶瓷、用 Al 连接 SiC 时,施加的压力对接头抗剪强度的影响如图 7.22 所示。与加热温度和时间的影响一样,压力提高后也存在最佳压力以获得最佳强度,如用 Al 连接 Si_3N_4 陶瓷、用 Ni 连接 Al_2O_3 陶瓷时,最佳压力分别为 4MPa 和 $15 \sim 20\text{MPa}$ 。

压力的影响还与材料类型、厚度以及表面氧化状态有关。用贵金属(如 Au、Pt)连接氧化铝陶瓷时,金属表面的氧化膜非常薄,随着压力的提高,接头强度提高直到一个稳定

值。 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Pt}$ 扩散连接时压力对接头抗弯强度的影响如图 7.23 所示。

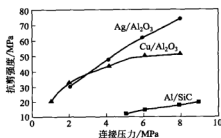


图 7.22 压力对接头抗剪强度的影响

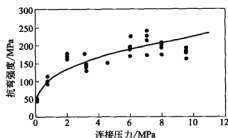


图 7.23 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Pt}$ 扩散连接时压力对接头抗弯强度的影响

(2) 界面结合状态

表面粗糙度对扩散焊接头强度的影响十分显著，表面粗糙会在陶瓷中产生局部应力集中，容易引起脆性破坏。 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Al}$ 接头表面粗糙度对接头抗弯强度的影响如图 7.24 所示，表面粗糙度由 $0.1\mu\text{m}$ 变为 $0.3\mu\text{m}$ 时，接头抗弯强度从 470MPa 降低到 270MPa 。

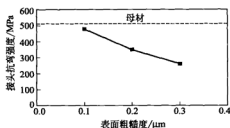


图 7.24 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Al}$ 接头表面粗糙度对接头抗弯强度的影响

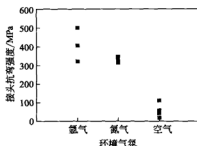


图 7.25 环境条件对 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Al}/\text{Si}_3\text{N}_4$ 接头抗弯强度的影响

扩散连接陶瓷与金属时，陶瓷与金属界面会发生反应形成化合物，所形成的化合物种类与连接条件（如温度、表面状态、杂质类型与含量等）有关。这种接头组合中可能出现的化合物见表 7.27。

表 7.27 各种接头中可能出现的化合物

接头组合	界面反应产物	接头组合	界面反应产物
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$	$\text{CuAlO}_2, \text{CuAl}_2\text{O}_4$	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Al}$	AlN
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}$	$\text{NiO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3, \text{NiO} \cdot \text{SiAl}_2\text{O}_3$	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ni}$	$\text{Ni}_3\text{Si}, \text{Ni}(\text{Si})$
SiC/Nb	$\text{Nb}_3\text{Si}_3, \text{NbSi}_2, \text{Nb}_2\text{C}, \text{Nb}_5\text{Si}_3\text{C}_x, \text{NbC}$	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Fe-Cr 合金}$	$\text{Fe}_3\text{Si}, \text{Fe}_4\text{N}, \text{Cr}_2\text{N}, \text{CrN}, \text{Fe}_x\text{N}$
SiC/Ni	Ni_2Si	AlN/V	$\text{V}(\text{Al}), \text{V}_2\text{N}, \text{V}_5\text{Al}_6, \text{V}_3\text{Al}$
SiC/Ti	$\text{Ti}_3\text{Si}_3, \text{Ti}_3\text{SiC}_5, \text{TiC}$	$\text{ZrO}_2/\text{Ni}, \text{ZrO}_2/\text{Cu}$	未发现有新相出现

扩散条件不同，反应产物不同，接头性能有很大差别。一般情况下，在真空扩散焊的接头强度高于在氮气和空气中连接的接头强度。用 Al 作中间层连接 Si_3N_4 时，环境条件对其接头强度的影响如图 7.25 所示。真空连接接头的强度最高，抗弯强度超过 500MPa 。而在大气中连接强度低，接头沿 $\text{Al}/\text{Si}_3\text{N}_4$ 界面脆性断裂，可能是由于氧化产生 Al_2O_3 的缘故，虽然加压能够破坏氧化膜，但当氧分压较高时会形成新的金属氧化物层，使接头强度降低。

在高温 (1500℃) 下直接扩散连接 Si_3N_4 陶瓷时, 由于高温下 Si_3N_4 陶瓷容易分解形成孔洞, 在 N_2 中连接可以限制陶瓷的分解, N_2 压力高时接头抗弯强度较高。在 1MPa 氮气中连接的接头抗弯强度 (380MPa) 比在 0.1MPa 氮气中连接的接头抗弯强度 (220MPa) 高 30% 左右。

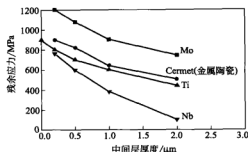


图 7.26 中间层厚度对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AISI405}$ 接头残余应力的影响 (1300℃, 100MPa, 30min)

扩散焊时采用中间层是为了降低扩散温度, 减小压力和减少保温时间, 以促进扩散和去除杂质, 同时也为了降低界面的残余应力。铁素体不锈钢与氧化铝陶瓷扩散焊时, 中间层降低残余应力的作用如图 7.26 所示。中间层厚度增大, 残余应力降低, Nb 与氧化铝陶瓷的线胀系数最接近, 作用最明显。但

是, 中间层的影响有时比较复杂, 如果界面有反应产生, 中间层的作用会因反应物类型与厚度的不同而有所不同。

中间层的选择很关键, 选择不当会引起接头性能的恶化。如由于化学反应激烈形成脆性反应物而使接头抗弯强度降低, 或由于线胀系数的不匹配而增大残余应力, 或使接头耐腐蚀性能降低。中间层可以不同的形式加入, 通常以粉末、箔状或通过金属化加入。各种陶瓷材料组合扩散焊的工艺参数及其性能见表 7.28。

表 7.28 各种陶瓷材料组合扩散焊的工艺参数及其性能

连接材料	温度/℃	时间/min	压力/MPa	中间层及厚度	环境气氛	强度/MPa
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Ni}$	1350	20	100	—	H_2	200 ^b (A)
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Nb}$	1600	60	8.8	—	真空	120(B)
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Pt}$	1550	1.7~20	0.03~10	—	H_2	200~250(A)
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Al}$	600	1.7~5	7.5~15	—	H_2	95(A)
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cu}$	1025~1050	155	1.5~5	—	H_2	153 ^b (A)
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}$	1375	1.7~6	0.7~10	—	H_2	220~231(A)
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{低碳钢}$	1450	120	<1	Co	真空	3~4(S)
	1450	240	<1	Ni	真空	0(S)
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{高合金钢}$	625	30	50	0.5mm Al	真空	41.5 ^b (T)
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}$	1100	15	120	—	真空	57~90 ^b (S)
$\text{Si}_3\text{N}_4\text{-WC/Co}$	610	30	5	Al	真空	208 ^b (A)
	610	30	5	Al-Si	真空	50 ^b (A)
	1050~1100	180~360	3~5	Fe-Ni-Cr	真空	>90(A)
$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Al}/\text{Si}_3\text{N}_4$	630	300	4	—	真空	100(S)
$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ni}/\text{Si}_3\text{N}_4$	1150	0~300	6~10	—	真空	20(S)
$\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{钢}$	610	30	10	Al-Si/Al/Al-Si	真空	200(B)
$\text{SiC} + \text{Nb}$	1400	30	1.96	—	真空	87(S)
SiC/Nb/SiC	1400	600	—	—	真空	187 室温, >100(800℃)
SiC/Nb/SUS304	1400	60	—	—	真空	125
$\text{SiC} + \text{SUS304}$	800~1517	30~180	—	—	真空	0~40
$\text{ZrO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$	1000~1100	90	>14	>0.2mm Ni	真空	57(S)

注: 强度值后面括号中的字母代表各种性能试验方法, A 代表四点弯曲试验, B 代表三点弯曲试验, T 代表拉伸试验, S 代表剪切试验; 上标 b 代表最大值。

(3) 工艺参数的选用

Al_2O_3 、 SiC 、 Si_3N_4 及 WC 等陶瓷研究和开发较早, 发展比较成熟, 而 AlN 、 ZrO_2 陶瓷发展得相对较晚。有关陶瓷接头的性能试验, 以往主要以四点或三点弯曲及剪切或拉伸试验来检验, 但陶瓷属于脆性材料, 只有强度指标不够完全, 测量接头的断裂韧度是有必要的。

陶瓷的硬度与强度较高, 不易发生变形, 所以陶瓷与金属的扩散连接除了要求被连接的表面平整和清洁外, 扩散连接时还必须压力大 (压力高达 $0.1\sim 15\text{MPa}$)、温度高 (通常为金属熔点 T_m 的 $0.5\sim 0.9$), 焊接时间也比其他焊接方法长得多。陶瓷与金属的扩散连接中, 最常用的陶瓷材料为氧化铝陶瓷和氧化锆陶瓷。与这类陶瓷焊接的金属有铜 (无氧铜)、钛 (TA1)、钛钽合金 (Ti-5Ta) 等。

氧化铝陶瓷材料具有硬度高、塑性低的特性, 在扩散焊时仍将保持这种特性。即使氧化铝陶瓷内存在玻璃相 (多半是散布在刚玉晶粒的周围), 陶瓷也要加热到 $1100\sim 1300^\circ\text{C}$ 以上才会出现蠕性, 陶瓷与大多数金属扩散焊时的实际接触首先是在金属的塑性变形过程中形成的。表 7.29 列出了各种 Al_2O_3 陶瓷与不同金属相匹配的组合、扩散焊接条件及接头抗弯强度。

表 7.29 各种 Al_2O_3 陶瓷与不同金属扩散焊接条件及接头抗弯强度

陶瓷-金属组合		气 氛	加热温度/ $^\circ\text{C}$	抗弯强度/ MPa
95%氧化铝瓷(含 MnO)	Fe-Ni-Co	H_2	1200	100
	Fe-Ni-Co	真空	1200	120
	不锈钢	H_2	1200	100
	不锈钢	真空	1200	200
	Ti	真空	1100	140
	Ti-Mo	真空	1100	100
72%氧化铝瓷	Fe-Ni-Co	H_2	1200	100
	不锈钢	真空	1200	115
	Ti	真空	1100	125
	Ni	真空	1200	130
99.7%氧化铝瓷	不锈钢	真空	$1250\sim 1300$	$180\sim 200$
	Ni	真空	$1250\sim 1300$	$150\sim 180$
	Ti	真空	$1250\sim 1300$	160
	Fe-Ni-Co	真空	$1250\sim 1300$	$110\sim 130$
	Fe-Ni 合金	真空	$1250\sim 1300$	$50\sim 80$
	Nb	真空	$1250\sim 1300$	70
	Ni-Cr	H_2	$1250\sim 1300$	100
	Ni-Cr	真空	$1250\sim 1300$	100
	Pd	H_2	$1250\sim 1300$	160
	Pd	真空	$1250\sim 1300$	160
	3 号钢	H_2	$1250\sim 1300$	50
	3 号钢	真空	$1250\sim 1300$	50

注: 真空度均为 $10^{-2}\sim 10^{-3}\text{Pa}$; 保温时间 $15\sim 20\text{min}$ 。

陶瓷与金属直接用扩散焊连接有困难时,可以采用中间层的方法,而且金属中间层的塑性变形可以降低对陶瓷表面的加工精度。例如在陶瓷与 Fe-Ni-Co 合金之间,加入 $20\mu\text{m}$ 厚的 Cu 箔作为过渡层,采用压力 15MPa,时间为 10min,在加热温度 1050°C 工艺下可得到抗拉强度 72MPa 的扩散焊接头。

中间过渡层可以直接使用金属箔片,也可以采用真空蒸发、离子溅射、化学气相沉积(CVD)、喷涂、电镀等。还可以采用烧结金属粉末法、活性金属活化法,金属粉末或钎料等均可实行扩散焊接。扩散焊工艺不仅用于金属与陶瓷的焊接,也可用于微晶玻璃、半导体陶瓷、石英、石墨等与金属的焊接。

无机非金属材料与金属扩散焊的工艺参数见表 7.30。表 7.31 列出了无氧铜与 Al_2O_3 陶瓷在 H_2 气氛中的扩散焊工艺,表 7.32 列出了 Fe-Ni 合金与 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 蓝宝石扩散焊的工艺参数,表 7.33 列出了铜与硫化锌陶瓷扩散焊的工艺参数。

表 7.30 无机非金属材料与金属扩散焊的工艺参数

材料组合	过渡层	焊接温度 / $^\circ\text{C}$	压力 /MPa	保温时间 /min	真空度 /Pa	备注
硅铝玻璃+Nb	—	840	50~100	15	$(2\sim5)\times 10^{-2}$	抗拉强度 18MPa, 耐腐蚀, 650°C , 800h
石英玻璃+Cu	蒸 Cu $5\sim 10\mu\text{m}$	950	10	30	$10^{-1}\sim 5\times 10^{-2}$	抗拉强度 29MPa, 耐 700°C 热冲击
微晶玻璃+Cu	—	850~900	5~8	15~20	$10^{-2}\sim 10^{-3}$	抗拉强度 139MPa, 600°C 热冲击 16 次
	Al 箔	420	5	45	10^{-2}	—
微晶玻璃+Al	—	620	8	60	10^{-2}	—
94% Al_2O_3 瓷+Cu	—	1050	10~12	50~60	—	H_2 中,抗弯 230MPa
95% Al_2O_3 瓷+Cu	—	1000~1020	20~22	20~25	—	H_2 中, $\phi 135\text{mm}$ 瓷件
95% Al_2O_3 瓷+4J42	—	1150~1250	15~18	8~10	10^{-1}	—
BeO 瓷+Cu	Ag 箔 $25\mu\text{m}$	250~450	10~15	10	—	—
(ZnO-TiO)瓷+Ti	CVD 沉积 Ni	750	15	15	10^{-2}	—
(Al_2O_3 -SiC-Si)瓷+ (Ni-Cr)	沉积 Ni	650	15	15	10^{-2}	(Ni-Cr)合金中 Ni 80%, Cr 20%
ZrO ₂ 瓷+Pt	Ni 箔	1150~1300	2~3	5~20	10^{-2}	—
硅晶体+Cu	镀 Au, (Ni)	370	20	60	10^{-1}	—
硅晶体+Mo	镀 Ag $6\sim 8\mu\text{m}$, 夹 Ag 箔 $10\sim 30\mu\text{m}$	400	5~300	50~60	—	$300\sim 196^\circ\text{C}$ 热循环 5 次
硅晶体+W	—	1100~1150	17	30	10^{-1}	—
	Al 箔 0.1mm	500	23	60	10^{-1}	—
石墨+Ti	镀 Ni $10\sim 30\mu\text{m}$	850	3	35	10^{-1}	—
	Ni 箔 $1\mu\text{m}$	850	1	35	10^{-1}	—
		1100	7	45	10^{-1}	—
石墨+不锈钢	—	1250~1300	1~2	5	5×10^{-4}	—
石墨+Mo, Nb	Cr, Ni 粉	1650~1750	1	5	—	惰性气体, Cr 粉 80%, Ni 粉 20%

表 7.31 无氧铜与 Al_2O_3 陶瓷在 H_2 气氛中扩散焊的工艺参数

陶瓷与金属	厚度/mm	工 艺 参 数						
		焊接温度/℃	保温时间/min	压力/MPa	加热速度/℃·min ⁻¹	冷却速度/℃·min ⁻¹	总加热时间/min	总冷却时间/min
Al_2O_3 + 无氧铜	7+0.4	1000	20	19.6	10	3	60~70	120
Al_2O_3 + 无氧铜	7+0.4	1000	20	21.56	15	10	70	120
Al_2O_3 + Cu	7+0.5	1000	20	21.56	10	3	70	120
Al_2O_3 + Cu	7+0.5	1000	20	19.6	10	10	60	120

表 7.32 Fe-Ni 合金与 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 蓝宝石扩散焊的工艺参数

金属+陶瓷	气体	工 艺 参 数				
		焊接温度/℃	保温时间/min	压力/MPa	加热速度/℃·min ⁻¹	冷却速度/℃·min ⁻¹
Fe-Ni 合金+蓝宝石	H_2	1000	10	0.98(1.98)	20	5
Fe-Ni 合金+蓝宝石	H_2	1050	15	17.64	20	5
Fe-Ni 合金+蓝宝石	H_2	1100	10	4.9	20	5
Fe-Ni 合金+蓝宝石	H_2	1200	10	1.96	20	6
Fe-Ni 合金+蓝宝石	H_2	1250	15	4.9	20	7
Fe-Ni 合金+蓝宝石	H_2	1300	10(15)	4.9(7.24)	20	7

表 7.33 铜与硫化锌陶瓷扩散焊的工艺参数

材料组合	介质	工 艺 参 数			
		焊接温度/℃	保温时间/min	压力/MPa	真空度/Pa
铜+硫化锌陶瓷	氩气	800	40	7.81	1.33×10^{-1}
铜+硫化锌陶瓷	氩气	850	35	7.81(9.8)	1.33×10^{-1}
铜+硫化锌陶瓷	氩气	850	40	9.8	1.33×10^{-1}

7.3 真空扩散焊应用实例

7.3.1 TC4 钛合金板与 304L 不锈钢网的扩散焊

钛及钛合金具有高的比强度和优异的抗腐蚀性能,常与不锈钢焊接复合而用作火箭、卫星等的相关部件。扩散焊作为一种固相焊接方法,适用于异种材料的精密连接。

(1) 焊前准备

将 TC4 钛合金 (Ti-6Al-4V) 板料裁剪成 20mm×30mm×1.5mm 大小的尺寸。304L 不锈钢网目数为 285×2235,名义孔径为 7 μm ,同样裁剪成 20mm×30mm 大小的尺寸。

用粒度 1500 号 SiC 砂纸打磨钛合金板待焊面,使表面粗糙度达到 0.1~0.2 μm ,并迅速和不锈钢网一起放入无水乙醇中,超声波清洗 5min,再转入纯净无水乙醇中储存,等待装卡焊接。扩散焊前,将待焊件放入炉中 100℃烘干 10min,使乙醇挥发,露出洁净金属表面。将洁净的网与钛合金板搭接装卡 (如图 7.27 所示),放入炉中准备扩散焊。

(2) 扩散焊工艺

扩散焊设备为 FJK-2 型辐射加热扩散焊机,均温区为 $\phi 300\text{mm} \times 300\text{mm}$,最高加热温度为 1350℃;最高压力为 100kN,控制精度为 $\pm 50\text{N}$;极限真空度 $4.3 \times 10^{-4}\text{Pa}$ 。

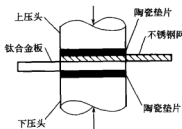


图 7.27 钛合金板与不锈钢网
扩散焊装卡示意图

扩散焊时，抽真空至 3.4×10^{-3} Pa，然后以 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率加热到焊接温度。焊接温度分别选取 800°C 、 825°C 和 850°C ，保温时间均为 60min。在温度升至保温温度时，施加 3MPa 的焊接压力，直至保温结束，并以 $3^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率冷却至室温后，再卸除压力。

扫描电镜分析表明，焊接加热温度 800°C 时，接触界面更多地保留了原始的压痕，网线与板面接触表面间隙明显。加热温度提高到 825°C 后，界面变形明显，不锈钢网线与钛合金表面接触变好。同时看到了界面有白色新相的富集，表明界面已有明显的元素扩散。能谱分

析表明，钛合金中的 Al、Ti、V 通过界面向不锈钢中扩散；而不锈钢中的 Cr、Ni 向钛合金中扩散，并在接触界面附近形成扩散梯度。当加热温度达到 850°C 时，接触界面已结合良好，剩余的未焊合部分都已圆润化而形成界面微孔。在不锈钢一侧形成的白色新相已连成一个窄长的区域，并离开界面一定的距离。

扩散焊后钛合金基体为退火态组织，由残留的体心立方结构的 β 相等轴晶和其晶界及晶内析出的密排六方结构的 α 相组成。Ni、Fe、Cr 在界面上的扩散梯度很明显，导致钛合金一侧的相对浓度提高。钛合金一侧一定深度内 α 相逐渐消失，呈现为近似单一的 β 相，这一 β 单相区的宽度约为 $13\mu\text{m}$ 。当焊接加热温度提高到 825°C 和 850°C 时， β 单相区宽度分别达到 $17\mu\text{m}$ 和 $24\mu\text{m}$ 。在焊接温度下，钛合金为单一 β 相，由于扩散来的 Ni、Fe、Cr 的固溶强化作用，使冷却后的 α 相析出变少。所以这一 β 单相区的宽度代表了元素在 TC4 钛合金中的扩散深度。在 $800\sim 850^\circ\text{C}$ 温度区间，钛合金一侧并没有明显的脆性相生成。

能谱分析发现，Cr 在界面不锈钢一侧出现了反常的峰值区域。这一区域随着加热温度的升高而增大，即发生 Cr 的上坡扩散现象。由 800°C 时的 Fe-Cr-Ti 三元相图可知，Cr 在 α -Fe 中的溶解度可达 35% 左右。但是随着 Ti 含量的增加，Cr 的溶解度降低。所以，开始时 Cr 向界面扩散并进一步扩散进入钛合金中，形成扩散梯度。但是随着 Ti 在不锈钢中含量的增大，使得 Cr 的溶解度降低，从而消耗了 Cr 沿浓度梯度上的扩散活度，形成扩散活度梯度，最终导致 Cr 由界面向 Ti 含量低的不锈钢内部反向扩散，从而在离界面一定深度处形成窄长的富 Cr 区域。这一区域在冷却过程中转变为 α 相。 α 相硬而脆，它的存在会影响接头的韧性和结合强度。304L 是超低碳不锈钢，在一定加热温度的保温时间内，不会大量析出碳化物脆性相，这有利于改善扩散焊接头的结合强度和韧性。

(3) 接头的剪切强度

TC4 钛合金与 304L 不锈钢扩散焊接头的剪切强度试验结果如图 7.28 所示。随着焊接加热温度的提高，剪切强度增大。加热温度 800°C 时剪切强度试验结果分散度较大，低的仅 55MPa，高的达到 90MPa。表明加热温度 800°C 时，界面的结合率低。焊接压力的不均匀与波动，以及加热温度的波动均会对剪切强度产生较大的影响，因而接头质量不稳定，剪切强度波动较大。

当加热温度提高到 825°C 时，剪切强度由 74MPa 增加到 97MPa，表明界面结合明显变

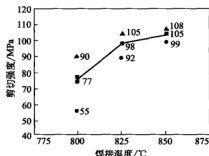


图 7.28 室温条件下扩散焊接头的剪切强度

好。温度继续升高到 850℃ 时, 剪切强度有所增大, 但平均增加幅值仅为 7MPa。温度继续升高时, 脆性化合物将会逐渐析出, 从而降低接头的力学性能。所以, 从剪切强度上看, 825~850℃ 是比较理想的焊接加热温度。

分析结果表明, 在试验条件下, 由于中间化合物与碳化物等脆性相的析出不突出, 所以影响接头强度的主要因素是加热温度。加热温度提高后, 被焊接材料的屈服强度降低, 从而使界面接触良好, 最终获得了焊接结合率的提高。

在 3MPa 焊接压力, 825~850℃ 焊接温度下保温 60min, 不添加中间过渡层金属, 成功地实现了 Ti-6Al-4V 钛合金板与 304L 不锈钢网的真空扩散焊接, 并使接头的剪切强度达到 90MPa 以上, 且在该温度区间内, 剪切强度随温度的升高而增大。

7.3.2 TA3 多层钛板与 TC4 底座的扩散焊

工业纯钛 TA3 中含有少量 Fe、Si、C 等元素, 是单相 α 型密排六方晶体结构。TC4 属 Ti-6Al-4V 系热处理强化钛合金, 是应用最广泛的钛合金之一, 约占航天工业中钛合金应用量的 50%。TC4 是 $\alpha+\beta$ 型双相组织, 其中 β 相是体心立方结构。合金元素 Al 和 V 以置换形式取代晶格中的 Ti 元素, 其中 Al 存在于 α 相中, V 存在于 β 相中, 起置换强化作用。其他元素起间隙强化作用。TA3 工业纯钛和 TC4 钛合金的化学成分见表 7.34。

表 7.34 TA3 工业纯钛和 TC4 钛合金的化学成分

材料	Al	V	Fe	Si	C	N	H	O	Ti
TA3	—	—	0.30	0.15	0.10	0.05	0.015	0.15	余量
TC4	5.6	3.5~4.5	0.30	0.15	0.10	0.05	0.015	0.15	余量

焊接试样共 12 层, 上部为 11 层厚度 0.3mm、直径 18mm 的 TA3 圆片相叠加, 然后放置于厚度 5.8mm 的 TC4 钛合金板底座上, 焊接装置如图 7.29 所示。真空扩散焊设备采用辐射加热方式, 最高工作温度为 1100℃。采用气动加压方式, 最大工作压力为 200kN, 压力控制精度为 $\pm 2\%$ 。热态极限真空度为 1.33×10^{-3} Pa。

(1) 焊接工艺

扩散焊前钛合金表面需要严格的清理, 以去除工件表面的油污、水分和氧化膜。钛合金在大气中表面会生成一层致密的 TiO_2 氧化膜。 TiO_2 是一种化学性质十分稳定的弱中性氧化物。扩散焊时, 只有在 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ Pa 的高真空条件下,

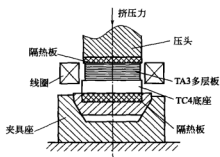


图 7.29 扩散焊装置示意图

TiO_2 才可能产生少量挥发, 而这样的真空条件扩散焊是很难达到的。所以致密的 TiO_2 在结合界面上大面积存在, 会导致接头出现氧化膜夹杂, 影响扩散焊的接头质量。

焊前清理包括打磨抛光、丙酮除油及酸洗除氧化膜等工序。TA3 与 TC4 的酸洗液均为 10% HF+30% HNO_3 水溶液, 温度为 25℃, 清洗时间为 25s。要求抛光后的表面粗糙度达到 0.8~1.6 μm 。

应指出的是, 由于 TA3 工业纯钛的固态相变点为 882℃, 而 TC4 钛合金为 990℃, 两者相差约 100℃, 所以 TA3/TA3、TA3/TA4 两类接头同时进行扩散焊, 给工艺参数的确定带来一定的困难, 因为一般扩散焊的温度为固态相变点以下 60~70℃。

将清理晾干后的试样在夹具中按要求叠放, 放置于真空室中并预压紧。焊接工艺参数

为：真空度 $1.67 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 以上，加热温度 850°C ，保温时间 30min，工作压力 5MPa。

(2) 焊后检验

① TA3 钛合金层板扩散焊 金相分析表明，TA3 层板间各原始界面完全消失，在界面处达到扩散连接。没有发现晶粒的长大现象，扩散焊接头的总体质量较好。焊接过程中，层板初始阶段凹凸不平的接触界面在焊接预压力下发生塑性变形，在焊接温度下发生再结晶，在界面处生成新的晶粒；加之界面两侧原子的相互扩散，导致新生晶粒和原有晶粒沿界面向两侧生长，从而使接触界面消失。

常温下 TA3 是 α -Ti 密排六方晶体结构，超过 882°C 时发生固态相变，从 α -Ti 转变为体心立方结构的 β -Ti，并伴随晶粒的明显长大，所以焊接加热温度须控制在 882°C 以下。加热温度超过 850°C 时，将发生严重的晶粒长大现象，例如加热到 870°C 时，保温时间仅为 5min，晶粒尺寸达到 850°C 时的 3~5 倍。尽管 TA3 晶粒长大对温度敏感，但由于温度在相变点附近时，原子具有很高的活性，扩散系数显著提高。所以，焊接加热温度接近相变点有利于减小残余微孔数量和氧化膜夹渣，提高界面结合质量。

焊接压力保证了在焊接过程中接触面的紧密贴合，为实现界面结合创造必要条件。焊接压力在结合面上产生的局部变形，保证了再结晶晶粒的生长。界面处产生变形或变形量大的区域首先形核，通过原子的扩散，迅速沿界面或向内部生长。在晶粒沿界面生长的过程中，将绕过界面局部变形后留下的间隙（即孔洞），孔洞经过收缩并部分消失，在晶内留下微孔。多层 TA3 层板扩散焊接头沿界面约 20% 的长度上焊后存在晶内微孔，但不明显。

金相分析还发现，沿着晶界平行或垂直方向有许多 α -Ti 孪晶晶界，孪晶变形比较明显的地方，塑性变形充分，且没有晶内微孔出现；在压力相对较小、没有产生孪晶变形的部位，有微孔出现。这种压力的不均匀源于工件多层的复杂结构。这一结果表明，焊接压力促进了孔洞的收缩和消失；同时也表明，多层薄板结构扩散焊对压力的均匀性很敏感，保持压力的均匀性是很重要的。

α -Ti 溶氧能力较强，在扩散焊温度时，溶解度可达到 14.5%，所以在 TA3 层板结合面上没有发现大面积的氧化膜夹渣。在扫描电镜下观察，界面上微孔表现为不连续的孔洞，大部分孔洞内表面存在氧化膜，残余微孔与氧化膜结合在一起。提高焊接压力，可在减小残余微孔的同时减小氧化膜夹渣。适当提高焊接压力是提高扩散焊接头质量的有效手段。

② TA3/TC4 扩散焊 与 TA3 多层板扩散焊接头不同，TA3/TC4 扩散焊接头中没有出现晶内微孔和界面孔洞。这表明，TA3/TC4 异种材料的软+硬的结合，有利于界面孔洞的消失。与 TA3/TA3 两者皆软的焊接结构相比，TA3+TC4（软+硬）界面在初始接触后，凹凸不平的界面上软相 TA3 在硬相 TC4 面上产生较大的塑性变形和更大面积的紧密接触，有利于减少接触面上的孔洞数量与尺寸。其次，在焊接加热温度和压力下，TA3 在 TC4 界面上产生持续塑性变形，使 TA3 表面出现更多的位错。位错使表面产生“微凸”点，产生新的无污染表面。在表面进一步压紧变形时，这些“微凸”点首先形成金属键连接。

TC4 钛合金的晶粒尺寸较小，TA3/TC4 界面上更容易产生原子扩散、晶界迁移、新相晶核生成并长大等再结晶现象。所有这些现象促进了界面孔洞的消失，这是 TA3/TC4 扩散焊容易获得高质量接头的原因之一。

TA3/TC4 扩散焊的缺陷主要是氧化膜夹渣。当表面清理不当时，TA3/TC4 界面局部上会出现连续的 TiO_2 夹渣。 TiO_2 在焊接温度和压力下不分解、不挥发，所以残留在界面上的 TiO_2 主要靠氧离子向基体中溶解来消除。与 TA3 多层板焊接不同的是，其中的 TC4 属于 $\alpha+\beta$ 型双相组织， β 相的溶氧能力差，不到 α 相的 10%。所以当表面清理不彻底，特别是致密的 TiO_2 氧化膜没有彻底清除时，将出现氧化膜夹渣，影响结合率。当严格按照清

理规程操作时,出现氧化膜夹渣的可能性较小。

总之,TA3多层板真空扩散焊和TA3/TC4真空扩散焊,可以获得优质的焊接接头。控制焊接加热温度 850°C 可以抑制晶粒的长大,较高的加热温度有利于提高接头质量。TA3多层板扩散焊时,加压不均匀易造成结合界面上孔洞收缩不彻底,而留有晶内微孔。适当提高压力,可在减少残余微孔的同时减少氧化膜夹渣,从而提高接头质量。TA3/TC4扩散焊时(属于软+硬结合),有利于界面孔洞的消失,但应注重焊前表面清理,以去除表面致密的 TiO_2 氧化膜,避免接头氧化膜夹渣的产生。

7.3.3 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TA1}$ 复合加速管的扩散焊

加速管是电子加速器中使用的一个重要部件,由陶瓷和金属电极片两种材料组成,其结构和外形如图7.30所示。陶瓷型号为95等静压 Al_2O_3 陶瓷,内径和外径分别为 $\phi 164\text{mm}$ 和 $\phi 180\text{mm}$,高度为 20mm ;金属电极片采用工业纯钛TA1,厚度 0.7mm ,加速管的尺寸规格由使用条件来决定。

加速管的工作环境较为恶劣,内部是高真空,外部有 0.7MPa 左右的气压,电极片加 $0\sim 1.5\text{MV}$ 的高电压。这种规格的加速管由于直径大、焊接面积大,有一定的焊接难度,经多次试验终于通过扩散焊方法试验成功。

(1) 焊接前的准备

对焊件表面进行机械加工处理,陶瓷待焊接面进行磨削加工,使其表面粗糙度 $R_a \leq 1.6\mu\text{m}$,平面度 $\leq 0.002\text{mm}$ 。扩散焊前对陶瓷件和纯钛片进行认真清洗,去除陶瓷件表面的油污及纯钛片表面的氧化层和油污。由于上述物质在焊接时会影响原子的扩散,影响焊接效果,所以焊接过程中始终保持焊件的清洁十分必要。对清洗过的纯钛片在烘箱内进行烘干处理,以去除水分;对清洗后的陶瓷环在炉中进行焙烧以去除油污等杂质。

(2) 工艺参数的确定

① 真空度 考虑到成本、设备状况等因素,一般控制在 10^{-4}Pa 以上为宜,真空度过低会导致金属件被氧化等不良现象的发生。

② 加热温度 与被焊件的材料有关,加速管是用等静压工艺制成的95陶瓷(Al_2O_3)和工业纯钛TA1两者焊接而成,同时选择厚度 $\delta=0.2\text{mm}$ 的铅箔作为中间过渡层,铅箔的熔点约为 658°C ,所以确定焊接加热温度为 $620\sim 630^{\circ}\text{C}$ 。

③ 保温时间 与被焊件的尺寸大小有关,尺寸越大,保温时间应该越长,以保证被焊件能够充分而且均匀受热;焊接加速管的保温时间为 $180\sim 240\text{min}$ 。

④ 压力 经多次试验证明,压力不应超过 12MPa (实际焊接时的压力是 11MPa),根据陶瓷环受压面积计算出的压力为 47kN 左右。加压过程应分步进行,逐步加压,不宜一次加压到位,在保温之前完成加压即可,防止因温度升高陶瓷环被压裂。

⑤ 加热速度 加热速度不宜过快,升温太快会导致炉中的真空度迅速降低,另一方面也会导致炉内温度分布不均匀,从而使被焊件受热不均匀,影响焊接效果。所以加热速度控制在每小时温升不超过 100°C 为宜。

⑥ 降温速度 降温速度也不宜过快,如果降温速度太快,由于材料的热胀冷缩效应会导致被焊件发生开裂,所以降温速度应 $\leq 50^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。随着温度的降低(一般降到 200°C 左右),炉中的降温速度会越来越慢,此时不能再进行温度控制,可让炉腔自然冷却,直至室温。

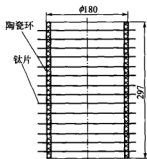


图 7.30 加速管结构和外形示意图

(3) 焊后检验

焊接好的加速管要进行真空和绝缘性能测试。

① 真空测试 分两步进行：第一步先将加速管置于大气中，内部抽真空进行检漏；第二步将检漏合格的加速管置于压力为 1.2MPa 的高纯 N_2 中，在加速管外部受压的情况下内部抽真空进行检漏。经过真空检漏，加速管泄漏率在 $10^{-9} Pa \cdot m^3/s$ 左右，符合使用要求。

② 加速管绝缘性能测试 对置于 1.2MPa 的高纯 N_2 中的加速管，在相邻每个电极片上加 40kV 的直流电压，无短路现象，符合使用要求。

通过扩散焊制成的加速管经真空检漏，可满足使用性能要求，这对电子加速器的推广应用起到了积极作用，同时也为陶瓷与金属的焊接积累了宝贵的经验。

7.3.4 镁合金与钛合金的瞬间液相扩散焊

(1) 焊接性分析

镁合金密度低，比强度、比刚度高，阻尼性、导热性好，电磁屏蔽能力强，是飞行器等运载工具结构件的理想材料，同时其资源丰富，易于切削加工，尺寸稳定性好，这些特点有利于降低镁合金零件的制造成本。但镁合金在耐蚀性、室温塑性以及高温条件下的力学、热力学稳定性等方面的不足阻碍了镁合金的应用。根据使用环境，在结构件的不同部位选取不同材料，并通过焊接使其成为一体，是降低成本、充分利用不同材料优势的有效手段之一。

由于钛合金在飞行器制造中具有良好的应用基础，所以实现镁合金与钛合金可靠连接有利于推广镁合金在该领域中的应用。镁、钛合金的熔点分别为 $650^\circ C$ ， $1668^\circ C$ ，相差较大，同时，镁、钛易被氧化为高熔点氧化物 MgO （熔点 $2830^\circ C$ ）和 TiO_2 （熔点 $1843^\circ C$ ），所以用熔焊方法焊接镁、钛合金存在诸多困难。相对于熔焊，扩散焊更适合易氧化及异种材料的连接。镁合金的扩散焊研究表明，可以通过超塑性扩散焊或瞬间液相扩散焊实现其可靠连接。在异种材料连接方面，镁合金与钛合金直接接触扩散焊难以实现可靠连接，其原因有以下两方面。

① 镁、钛两类合金不存在叠交的超塑性变形温度区。

② $Mg-Ti$ 二元相图表明， Mg 在 Ti 基体中的溶解度小于 2%（原子分数）， Ti 在 Mg 基体中的溶解度小于 0.1%（原子分数），因此必须采用中间层金属。镁合金的熔点限制了扩散焊温度的提高，同时为避免镁合金晶粒的严重长大，扩散焊温度应低于 $500^\circ C$ ，然而大多数固相金属材料在这样的温度下无法得到较高的扩散系数。瞬间液相扩散焊的接触熔化与等温凝固机制可有效地降低扩散焊温度。而异种材料瞬间液相扩散焊的先决条件是中间层金属至少能与一侧材料形成低熔点共晶，并在另一侧材料中有较大的溶解度。符合这一条件的中间层金属有 Ni 、 Cu 、 Ag 、 Al ，它们与 Mg 的共晶温度分别为 $507^\circ C$ 、 $485^\circ C$ 、 $478^\circ C$ 、 $437^\circ C$ 。由于 Ni 、 Cu 可明显降低镁合金的抗腐蚀能力，同时 Ni 、 Cu 、 Ag 与 Mg 的共晶温度较高，所以 Al 是镁、钛合金瞬间液相扩散焊的理想中间层材料。

(2) 试验方法及结果

中间层铝箔纯度为 99.9%，厚度 $15\mu m$ 。镁合金（AZ31B）和 TC4 钛合金（Ti-6Al-4V）试件尺寸均为 $30mm \times 20mm \times 5mm$ ，化学成分如表 7.35 所示。扩散焊时，两者在长度方向搭接，搭接长度 20mm。扩散焊前用粒度 1500 号 SiC 砂纸打磨试样的待焊面，保证表面粗糙度 $Ra < 0.2\mu m$ ，用 2% 的硝酸酒精清洗 AZ31B，用 Keller 试剂（2mL $HF + 3mL HCl + 15mL HNO_3 + 190mL H_2O$ ）清洗铝箔和 Ti-6Al-4V 钛合金，乙醇超声波清洗 5min，再转入分析纯乙醇中存放，待焊。

表 7.35 AZ31B 镁合金和 Ti-6Al-4V 钛合金的化学成分

%

材料	Al	Zn	V	Ca	Cu	Fe	Mn	Si	O
AZ31B 镁合金	2.5~3.5	0.6~1.4	—	0.04	0.05	0.005	0.2	0.1	—
Ti-6Al-4V 钛合金	6	—	4	—	—	0.25	—	—	0.2

扩散焊设备为 FJK-2 型辐射加热扩散焊机, 均温区 $\phi 300\text{mm} \times 300\text{mm}$, 最高加热温度 1350°C , 加载能力 $100\text{N} \sim 100\text{kN}$, 热态极限真空度 $4.3 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 。扩散焊时, 将带有乙醇液膜的试件装入真空炉中, 在抽真空过程中乙醇挥发, 露出洁净金属表面。真空度小于 $4.0 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 时开始加热, 加热温度分别为 430°C 、 440°C 、 450°C 、 470°C 和 485°C , 保温时间 $60 \sim 180\text{min}$, 保温过程中施加 0.6MPa 轴向压力。由于镁在加热状态下具有较高的蒸气压, 所以在加热到 200°C 时, 充入 100Pa 纯度 99.9% 的氩气。

试验表明, 加热温度 430°C 、 440°C 的接头未焊合, 主要原因是由于加热过程中 AZ31B/Al/Ti-6Al-4V 接触界面未出现液相。分析表明 AZ31B/Al 界面产生液相的加热温度至少为 450°C (升温过程中材料处于非平衡态)。

加热 450°C 、 470°C 和 485°C , 保温时间 180min 的结合界面均无微孔出现, 界面结合率良好。同时界面处产生了不同于 AZ31B 与 Ti-6Al-4V 的组织。但出现的部位有所差别, 加热温度 450°C 的接头, 新相更多的偏向 Ti-6Al-4V 一侧; 加热温度 470°C 和 485°C 的接头, 两侧均有新相产生, 但 AZ31B 一侧的新相区域较宽。

(3) 连接强度及断面分析

加热温度 450°C 、 470°C 和 485°C 各焊接 3 个试样, 三种扩散焊接头的平均剪切强度如图 7.31 所示。加热温度 $450 \sim 470^{\circ}\text{C}$ 之间, 接头强度随加热温度的提高而增加。

加热温度 450°C 时, Al/Ti-6Al-4V 界面上 Al、Ti 的反应比较充分, 因此接头强度主要受控于 AZ31B/Al 界面的结合情况。由 Al-Mg 二元相图可知, 加热温度高于 450°C 时, 存在 Al、Mg 混合液相的成分区域宽度与温度成正比。所以 $450 \sim 470^{\circ}\text{C}$ 之间保温时, 温度越高, AZ31B/Al 界面产生的液相越多, 液相所占界面面积越大, 等温凝固过程越充分, 接头强度越高。而当温度高于 470°C 时, 由于接头区域新相 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 、 Al_3Ti 晶粒的长大, 接头的强度有所降低。

采用铝箔为中间层, 可以实现 AZ31B 镁合金与 Ti-6Al-4V 钛合金的瞬间液相扩散焊, AZ31B/Al/Ti-6Al-4V 扩散焊接头的连接强度主要受控于 AZ31B/Al 界面的结合效果。加热温度 470°C 、保温时间 180min 的扩散焊接头的剪切强度较高, 为 72MPa , 为 AZ31B 镁合金母材 (86MPa) 的 83.7% 。

7.3.5 DD3 单晶合金航空发动机叶片的扩散焊

DD3 合金是国内研制的第一代单晶合金, 其成分较简单, 不含稀缺贵重元素, 成本较低, 中、高温性能良好。对 DD3 合金过渡液相扩散焊 (TLP 扩散焊) 工艺研究结果表明, 采用以母材成分为基或将母材中的 Al 和 Ti 去除、并以 B 作为降熔元素的粉末中间层合金 D1P 或非晶态箔带中间层合金 D1F, 可实现 DD3 单晶合金的过渡液相扩散焊。 $1250^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$ 规范扩散焊接头 980°C 持久强度约为母材性能的 70% , 1250°C 保温 24h 以上、并在焊后进行 $870^{\circ}\text{C} \times 32\text{h}$ 时效处理, 扩散焊接头 980°C 持久强度可达母材性能的 90% 。

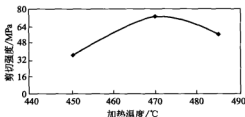


图 7.31 不同加热温度扩散焊接头的剪切强度

李晓红等研究测试了采用较短保温时间 ($1240^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$) 扩散焊, 并在焊后进行固溶-时效处理接头的中、高温拉伸强度和持久强度。

(1) 试验方法及试验材料

试验用母材为 DD3 单晶合金, 其化学成分、热处理制度和力学性能要求见表 7.36 和表 7.37。试验中间层合金为专为 DD3 合金过渡液相扩散焊设计制备的, 代号为 XH4A, 其成分以 DD3 合金为基, 加入 2%~3% (质量分数) 的 B 作为降熔元素, DTA 测试其熔化温度范围为 $1100 \sim 1198^{\circ}\text{C}$, 使用形式为 $50 \sim 60\mu\text{m}$ 。

表 7.36 DD3 合金的主要成分 (质量分数)

C	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Fe	Ni
0.010	9.0~10.0	4.5~5.5	5.0~6.0	3.5~4.5	5.5~6.2	1.7~2.4	≤ 0.5	余量

表 7.37 DD3 合金的热处理制度和力学性能技术指标

热处理制度	测试温度/ $^{\circ}\text{C}$	抗拉强度 R_m/MPa	持久性能	
			应力/ MPa	寿命/h
$1240^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$, 空冷 $+ 870^{\circ}\text{C} \times 32\text{h}$, 空冷	760	≥ 1030	785	≥ 70
	900	≥ 835	—	—
	1030	—	165	≥ 70

为了防止由于机械加工应力导致在焊接热循环中母材发生再结晶, 试样的焊前表面准备采用按母材热处理制度处理+线切割+砂纸打磨的方法。焊前所有试样均用丙酮超声波清洗去油。扩散焊试验在 L1215 II-1/ZM 型真空炉中进行。扩散焊温度为 1240°C (略低于母材固溶处理温度), 保温时间为 4h, 焊后按母材热处理制度 (见表 7.37) 进行固溶-时效处理。采用图 7.32 所示形式的试样测定接头的力学性能。

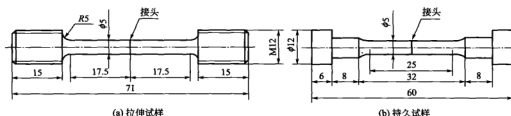


图 7.32 测定接头力学性能的试样

(2) 接头的力学性能

采用 XH4A 中间层合金和 $1240^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$ 的规范扩散焊 DD3 合金, 可获得致密完整的扩散焊接头。在 $1240^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$ 规范下的扩散焊接头, 焊缝两侧为 $\gamma + \gamma'$ 双相组织, 焊缝中央为几乎连续的 $\gamma + \gamma'$ 花团状共晶, 周围有一些骨架状硼化物相。焊后经固溶-时效处理后, 焊缝中的 $\gamma + \gamma'$ 花团状共晶和硼化物相完全扩散消除, 近缝区有少量细小的块状和针状硼化物相, 焊缝和母材之间的界面已不明显, 即焊后固溶-时效处理过程有效地改善了接头组织。

扩散焊接头力学性能的测试结果见表 7.38。

扩散焊接头 760°C 抗拉强度测试值为 $1087 \sim 1119\text{MPa}$, 达到 $\geq 1030\text{MPa}$ 的母材性能指标; 900°C 抗拉强度测试值为 $866 \sim 886\text{MPa}$, 也达到了 $\geq 835\text{MPa}$ 的母材性能指标; 760°C 的持久强度达到母材性能指标的 90% (706.5MPa 应力下持久寿命均在 70h 以上); 1040°C 持

久强度则到母材性能指标的80% (132MPa应力下持久寿命均在70h以上)。而且DD3合金经1240℃×4h热循环后,再按母材标准热处理制度进行固溶-时效处理,其组织和性能与标准热处理态完全相同。采用的过渡液相扩散焊工艺对DD3母材的组织 and 性能没有不利影响。

表 7.38 扩散焊接头力学性能的测试结果

测试温度/℃	抗拉强度 R_m /MPa	持久性能		
		应力/MPa	寿命/h	说明
760	1087, 1119, 1106	628	189, 189.5, 186	70h 应力增至 706.5MPa 140h 应力增至 785MPa
		706.5	81, 87, 97.58	70h 应力增至 785MPa
900	866, 882, 881, 872, 886	—	—	—
1040	—	132	93, 100.5	70h 应力增至 148.5MPa

7.3.6 冷作模具钢与弹簧钢的扩散焊

高碳高合金冷作模具钢中的碳化物偏析较严重,容易导致方向性变形和强韧性降低。而冷作模具钢与合金弹簧钢双金属复合可用来代替高碳高合金冷作模具钢克服上述缺点,并且节约资源,降低成本。大连交通大学周彦彬等对不加中间层的冷作模具钢与合金弹簧钢双金属的真空扩散连接进行了试验研究。

(1) 材料及试验方法

试验所用材料为直径16mm的50CrVA棒料、厚度6mm的Cr12MoV钢板材,其化学成分见表7.39。

表 7.39 所用材料的化学成分 (质量分数)

材料牌号	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Cu	Ni	Fe	S	P
Cr12MoV	1.53	0.25	0.22	12.20	0.46	0.25	0.12	0.09	余量	0.005	0.022
50CrVA	0.47	0.26	0.59	0.93	—	0.13	0.17	0.05	余量	0.008	0.013

取直径16mm的50CrVA棒料切成 $\phi 16\text{mm} \times 50\text{mm}$ 圆柱体(端面不留中心孔),并将两端面磨平磨光,保证两端面平行;取厚度6mm的Cr12MoV钢板用平面磨床将两面磨平磨光,然后线切割成 $\phi 16\text{mm} \times 6\text{mm}$ 的圆片,用乙醇清洗柱体的端面和圆片的两面。在2根50CrVA圆柱体中间夹1片Cr12MoV圆片组成1组试样(见图7.33)。取4组试样固定在1个圆套筒中放入HZK-40型真空扩散焊炉中进行真空扩散焊(见图7.34)。

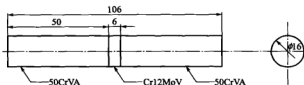


图 7.33 焊前装夹

焊接温度为1100℃、1150℃和1200℃,焊接压力为20MPa,保温时间30min,真空度不低于0.1Pa。真空扩散焊后在箱式电阻炉中进行等温退火(850℃×2h,然后降温到740℃,保温3h后炉冷至室温)。将退火试样加工成 $\phi 10\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的弯曲试样及标距长度为 $\phi 12\text{mm} \times 30\text{mm}$ 的拉伸试样。拉伸试样中间段经磨光、抛光;弯曲试样经淬火-回火后

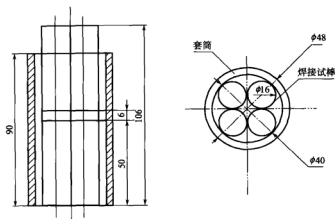


图 7.34 试棒与套筒

用无心磨床将表面磨光 (1050℃ 淬火, 200℃ 回火 2h, 为低淬低回工艺)。用万能材料试验机对试样进行拉伸试验和弯曲试验。

(2) 扩散焊接头性能

对退火态试样进行拉伸试验, 测定抗拉强度; 对淬火-回火态试样进行弯曲试验, 测定抗弯强度, 试验结果见表 7.40。

表 7.40 焊接温度与抗拉强度及抗弯强度的关系

焊接温度/℃	抗拉强度 R_m /MPa	抗弯强度 R_{bh} /MPa	断裂位置
1100	520	1070	焊接结合面
1150	685	1820	Cr12MoV
1200	710	1700	Cr12MoV

焊接温度为 1100℃ 时, 断裂发生在焊接面上; 焊接温度为 1150℃ 及 1200℃ 时, 断裂均发生在高硬度、高耐磨的 Cr12MoV 上。焊接面的结合强度已高于 Cr12MoV 的抗拉强度, 宏观断口为脆性断口, 微观断口为准解理断口。

(3) 接头硬度

不同焊接温度下退火态拉伸试样的硬度 HRB 及淬火-回火态弯曲试样的硬度 HRC 见表 7.41。由表可见, 由于采取低淬低回工艺, Cr12MoV 和 50CrVA 均可获得高的硬度。

表 7.41 Cr12MoV/50CrVA 退火状态及淬火-回火态的硬度值

焊接温度/℃	硬度 HRB(退火态)	硬度 HRC(淬火-回火态)
1100	95.5/90	59/53
1150	95/93	58.5/54
1200	100/90.5	59.5/54

7.3.7 35CrMo 石油钻杆的瞬时液相扩散焊

石油钻杆是由钻杆接头和杆体两构件分别制造后再连接而成。虽然摩擦焊工艺已成功地应用于钻杆焊接, 但在实际焊接过程中还存在一些缺陷, 例如会产生焊接错位、外壁留有飞边、焊接区组织粗大等。针对钻杆摩擦焊中的缺点, 王学刚等用钻杆瞬时液相扩散焊

(TLP) 连接设备, 在大气条件下加 Ar 气保护进行了钻杆的扩散焊连接, 获得了组织、性能合格的接头, 对扩散焊技术在石油工业中的应用有一定的意义。

(1) 试验材料

试验采用大庆油田提供的 127mm×10mm 的钻杆杆体和钻杆接头, 材料为 35CrMo。所用中间层为 Fe-Ni-Cr-Si-B 铁镍基非晶箔片, 熔点为 1050~1100℃, 厚度为 25μm, 其化学成分见表 7.42。

表 7.42 中间层的化学成分

元素	Fe	Ni	Cr	Si	B
质量分数/%	45.5	43	3.6	6	微量

(2) 焊接设备

图 7.35 是钻杆专用扩散焊设备, 主要由中频电源及感应加热器、夹具及液压、冷却系统、保护系统和控制系统组成。其中感应加热器为单匝上下对开, 内部有冷却水通道, 外侧有保护气路, 水电气一体化, 操作简单, 便于工件的安装和拆卸。液压系统提供夹紧力和顶紧力, 实现工件的固定和焊接压力。控制系统采用 PLC+PRC 模块, 并通过触摸屏设计工艺参数, 实现人机界面对话。冷却系统由水箱、水泵、散热片及风扇组成, 通过循环水冷却夹具、感应加热器及液压系统。

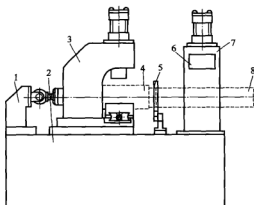


图 7.35 钻杆 TLP 连接设备示意图

1—后顶架；2—底座；3—C 形架；4—钻杆接头；5—感应加热器；
6—控制面板；7—龙门架；8—钻杆杆体

(3) 扩散焊工作过程

- ① 车削加工钻杆接头和杆体端面, 平均粗糙度为 $Ra\ 6.3\mu m$ 。
- ② 打开感应加热器, C 形架和龙门架上夹头抬起。钻杆接头安装在 C 形架定位座上, 行程开关控制 C 形架运行直到接头待焊端面位于感应加热器中心。钻杆杆体从右侧装入, 待两焊接端面接触时夹紧杆体。调整 C 形架上的定位座进行错位调整。
- ③ 运行 C 形架分离两待焊端面, 将与焊接端面等形状的 Fe-Ni-Cr-Si-B 中间层合金箔片置于两待焊端面, C 形架推后顶架, 压紧中间层合金箔片。
- ④ 合上感应加热器, 接通光纤测温仪, 打开冷却水和 Ar 气保护, 触摸屏设定焊接工艺和焊后热处理工艺, 通过 PLC+PRC 运行焊接程序。
- ⑤ 焊接程序结束后, 打开感应加热器, C 形架和龙门架上夹头上抬。焊接后的钻杆通

过下料机构从右侧下料, C形架退回左侧, 焊接完毕。

(4) 焊接工艺

加热温度 1215℃, 保温时间 4min, 压力 9MPa 的工艺参数下进行钻杆扩散焊。焊后加热温度 650℃, 保温 5min 回火。对焊后试样进行拉伸、弯曲试验。

(5) 接头分析

采用过渡液相扩散焊工艺焊接钻杆, 接头变形小, 焊缝处无摩擦焊时的飞边, 焊缝成形美观。拉伸试验时断在母材上, 扩散焊接头强度高于母材; 弯曲试验时, 接头处面弯、背弯 180°未断, 接头具有很好的塑性。

7.3.8 TP304 钢管的瞬时液相扩散焊

在电力、石油、化工、城建等建设工程中, 管道焊接的工作量非常大, 占安装工程总量的 20%~30%。采用瞬时液相扩散焊 (TLP) 替代焊条电弧焊对管道进行连接, 具有生产率高、焊接时间与管径及壁厚几乎无关、几分钟即可焊完一个管接头等优点, 效率是传统焊接方法的 10 倍以上, 大大节省了人力、物力和能源。西安理工大学井晓天等针对 TP304 钢管的瞬时液相扩散焊工艺, 探讨了工艺参数对接头组织和性能的影响。

(1) 试验设备和方法

瞬时液相扩散焊在开放式扩散焊机上进行, 采用高频感应加热, 用氩气保护, 弹簧加压, 压力设定为 4~10MPa。加热速率: 900℃以下 45℃/s, 900℃以上 30℃/s。

TP304 钢管的化学成分 (质量分数) 为: C 0.10%, Si 0.20%, Mn 0.80%, Ni 9.0%, Cr 18.0%, Nb 0.4%, 其规格和力学性能见表 7.43。管件试样连接端面精车, 并用丙酮清洗。扩散焊用的中间层成分见表 7.44。试验用工艺参数见表 7.45。

表 7.43 TP304 钢管的规格、力学性能

公称外径/mm	壁厚/mm	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{0.2}$ /MPa	伸长率 A/%	熔点/℃
63.7	4.8	520~560	300	35	1450~1480

表 7.44 非晶中间层的化学成分 (质量分数)

中间层	Si	Ni	Cr	B	Fe	熔点/℃
BNi2	4~5	其余	6~8	2.75~3.5	2.5~3.5	970~1010
FeNiCrSiB	4.5~7.5	30~38	3~5	4.5~8.5	其余	1080~1130
Fe78Si9B13	9	—	—	13	其余	1150~1165

表 7.45 TP304 钢管不同工艺条件下的力学性能

试样	温度/℃	时间/min	压力/MPa	中间层	抗拉强度 R_m /MPa	拉伸	弯曲
1	1210	3	6	2×BNi2	380	不合格	不合格
2	1210	3	6	BNi2	441	不合格	合格
3	1220	3	6	BNi2	535	合格	合格
4	1220	2	6	BNi2	456	不合格	不合格
5	1240	3	6	BNi2	480	不合格	不合格
6	1210	3	8	FeNiCrSiB	553	合格	合格
7	1230	3	8	FeNiCrSiB	562	合格	合格
8	1240	3	8	Fe78Si9B13	463	不合格	不合格

注: 拉伸合格标准为拉伸试样抗拉强度大于基体原始强度; 弯曲合格标准为试样背弯和面弯的角度为 180°。

(2) 接头力学性能

不同工艺条件下扩散焊接头的力学性能见表 7.45。可以看出, 1 号试样用双层 BNi2 中间层在 1210℃ 连接, 接头强度低, 弯曲性能不好; 2 号试样在 1210℃ 用单层 BNi2 中间层连接, 接头强度也不高; 用单层 BNi2 中间层, 在 1220℃ 连接可获得合格试样, 弯曲性能较好。用 FeNiCrSiB 中间层在 1210℃ 温度下连接, 强度偏低; 在 1230℃ 连接, 提高了界面扩散, 强度提高, 获得了拉伸和弯曲性能合格的接头试样。

如果加热温度低于 1210℃, 中间层对母材润湿不够, 降熔元素的扩散不充分, 不能完成瞬间液相扩散焊; 若延长保温时间, 接头强度下降; 而提高焊接温度于 1230℃ 以上, 由于奥氏体晶粒严重长大, 焊缝强度下降。用 Fe78Si9B13 中间层, 接头的拉伸强度和弯曲性能都不合格。

用 FeNiCrSiB 中间层时, 在焊缝中部由于 Cr 含量较低, 不容易形成硼铬化合物, 当硼扩散到连接界面和母材内部时, 容易生成硼铬化合物。当母材中 Cr 含量较低时, 在合适的工艺条件下, B 的扩散很充分, 不形成化合物。用 Fe98Si9B13 中间层时, 因为其中 Si、B 含量很高, 在等温凝固时容易形成化合物, 接头性能不合格。用 BNi2 中间层, 其中 Cr 含量比 Fe98Si9B13 高, 而 B 含量较低, 焊缝附近不容易形成化合物。

7.3.9 不锈钢多层薄壁零件的扩散焊

利用多层金属板片作造型材料, 进行分层实体制造, 可以实现功能块体器件快速成形。采用真空扩散焊技术, 利用多层薄壁奥氏体不锈钢作造型, 可以实现薄壁器件的分层实体制造。

试样材料为 0Cr18Ni9 不锈钢, 尺寸为 30mm×110mm, 壁厚仅 0.05~0.2mm 不等, 4~6 片按不同组合顺序叠加, 见图 7.36。要求经严格定位装配后, 焊接成一个实体, 总厚度 0.4~0.8mm, 长度与厚度比值达到 130 以上。焊后表面光洁平整, 长度方向上宏观翘曲变形量不超过 0.02mm, 厚度方向的收缩率不超过 0.8%。

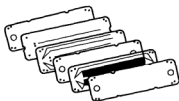


图 7.36 不锈钢薄片结构与装配

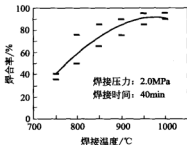


图 7.37 焊接温度对焊合率的影响

焊接设备采用 FJK-2 型喷射加热式真空扩散焊机。该设备均温区为 $\phi 300\text{mm} \times 300\text{mm}$, 最高加热温度可达 1350℃。温度控制精度为 $\pm 3^\circ\text{C}$, 加载能力 0.1~100kN, 热态极限真空度可达 $4.3 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 。

由于结构的焊接变形量控制要求苛刻, 焊接工艺参数需严格选取, 焊接温度为 750~1000℃, 然后根据焊合率进行优化; 焊接压力 2MPa, 焊接时间 40min。焊接温度对焊合率的影响见图 7.37。其中焊合率采用的是焊缝断面焊合线的总长度与焊接面长度之比。

温度越高, 在压力的作用下, 结合面上微观变形越大, 表面贴合面积也就越大, 经过扩散和再结晶, 留下的界面孔洞也就越小, 于是焊合率提高。在 2MPa 压力下, 当焊合率达到

70%时,温度需要达到或超过850℃。但当温度继续从900℃上升到1000℃时,对焊合率的贡献已很小。然而,当温度超过950℃后,反而引起较大的翘曲变形。对于多层薄壁件扩散焊,最严重的工艺缺陷是焊后变形,如图7.38所示。

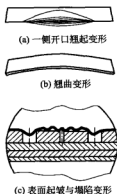


图 7.38 焊后结构变形示意图

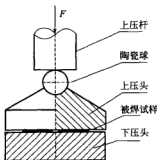


图 7.39 加压方式示意图

变形类型有一侧开口翘起变形、宏观翘曲变形和表面起皱与局部塌陷变形。当上、下压头的平行度不够时,所焊试样会像张开口的蚌壳,在一侧开口翘起,如图7.38(a)所示。这时,即使压力增加10倍(20MPa)也不能够消除这一缺陷,所以调整好上、下压头的平行度是焊接成功的关键。但由于扩散焊机制造中机械加工与装配的误差,导致上、下压头的平行度总是存在,所以,采取图7.39所示的加压方法,即上压头与压杆间采用陶瓷球作关节,从而保证加压过程中,焊接试样与压头表面充分贴合,可以消除一侧开口现象,将多层薄壁试样焊成一体。

第二种焊后变形现象是沿长度方向上的翘曲变形,见图7.38(b)。在110mm的试样长度上,试样中心弓起高度达5~10mm。焊接过程中的温度不均匀引起的热应力不均匀,以及试样板片轧制中的残余应力的释放,都可能引起焊后翘曲变形。试验表明,这类变形随着焊合率的增高而减小并最终消失。当焊接温度达到850~900℃,并焊后保压冷却到室温时,变形消失,焊成的实体平直度很好。分析表明,焊合率的增高,分散了每层薄壁试样的热应力,从而整体上体现了实体块材的力学性能,即最终是因为试样厚度变大,而分散了局部热应力集中,从而宏观上消除了热变形。

第三种变形现象是面层起皱或局部塌陷,如图7.38(c)所示。由于试样为多层薄壁零件叠加后焊成实体,每片薄片零件造型时,都在不同的位置开有沟槽或小孔,而使相邻层对应的位置上处于自由状态,在这些地方很容易产生局部变形,这种变形在面层上表现明显。实验表明,随着翘曲变形问题的解决,局部塌陷与起皱现象也随之消失。但当焊接温度高达950~1000℃时,尽管表面没有起皱,但表面塌陷现象又重新出现,并伴随少量翘曲变形。分析认为,当焊接温度过高时,在升温过程中即已完成焊接,当温度达到850℃时焊接接头已基本形成。于是在小孔周边由于焊合的拘束,会使其上方的自由薄壁部位,在温度继续升高的过程中,随着小孔的变形扩张,而产生一定量的永久性塑性扩展变形。变形后的部位会在随后的冷却中受到挤压失稳,而产生塌陷变形。所以,采取升高到焊接温度时再施压的工艺方法,可以部分减小这一变形现象,但是无法根除这一变形缺陷。只有限制小孔及沟槽在焊接热过程中的热膨胀量,才能有效地控制这类变形的产生。因此,适当降低焊接温度,对减小表面塌陷现象有重要意义。

试验结果表明,在焊接温度 850°C , 压力 2MPa , 保温时间 40min 的焊接条件下,零件的焊后变形量可以控制在允许范围内。长度方向上宏观翘曲变形量控制在 $0.01\sim 0.02\text{mm}$, 厚度方向的平均收缩率控制在 $0.005\sim 0.006\text{mm}$ 。

7.3.10 石墨与 Q345 钢复合板的扩散焊

图 7.40 所示的成形模具,是石墨板与钢板结合的复合板。这种复合板是采用扩散焊接方法将石墨板与 Q345 钢板焊接在一起。

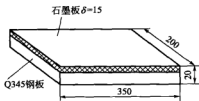


图 7.40 复合板的结构

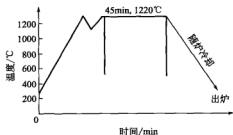


图 7.41 扩散焊工艺参数曲线

该复合板制成模具后在 $750\sim 800^{\circ}\text{C}$ 条件下,在 45min 不脱层;在室温条件下,模具在金属平台上滑动,石墨板与钢板不分层。

石墨在高温下产生的 CO 能还原 Fe 的氧化物,它在扩散过程中能有效地防止焊接接头氧化。采用扩散焊方法,正确选用中间过渡层和焊接温度,使钢板与石墨板相互接触的表面共熔,并借助毛细作用金属液流很好地填满焊缝附近的孔隙,增加了钢板与石墨板的接触面积,从而提高了焊接接头的强度,达到焊接的目的。

采用的焊接设备为升降式高温电阻炉,其额定功率为 60kW ,最高温度为 1300°C 。

(1) 焊前准备

① 将 Q345 钢板表面(与石墨板相接触的面)喷砂处理,去掉氧化皮,然后用丙酮清洗。

② 用压缩空气吹掉石墨板表面灰尘。

③ 在 Q345 钢板表面(接合面)用毛刷干刷一层粉末状的石墨粉,厚度为 0.1mm ,然后将石墨板放在钢板的接合面上,准备装炉。

(2) 焊接

① 炉温升至 1200°C 时,将装配好的钢板与石墨板放入炉中,钢板在下,石墨板在上。

② 加热至炉温回升至 1220°C 时(图 7.41),保温 45min ,随炉冷至 300°C 出炉,自然冷却,完成焊接过程。

7.3.11 铝-不锈钢导管过渡接头的扩散焊

焊件为 1060 铝与 $1\text{Cr}8\text{Ni}9\text{Ti}$ 不锈钢的异材导管过渡接头。导管直径为 $40\sim 80\text{mm}$,管壁厚度为 $3\sim 4\text{mm}$,要求焊接接头具有足够的液压强度和真空密封性,并能够承受 $-196^{\circ}\text{C}\pm 100^{\circ}\text{C}$ 的反复交变冷热冲击。

铝与不锈钢的物理、化学、力学及冶金特性差异很大,焊接时有两个技术难点:一是铝表面的致密氧化膜不易去除,妨碍扩散连接;二为铝与钢易生成脆性金属间化合物,造成接头脆性。因此采用真空扩散焊方法,控制炉内气氛及焊接工艺参数,防止焊接过程中发生氧化及生成金属间化合物。

接头形式采用管件套接, 管件端部加工成一定的配合锥度, 铝管端在接头外侧, 不锈钢管端在接头内侧, 如图 7.42 所示。为防止铝管热压变形, 将导管过渡接头装夹在夹具内, 如图 7.43 所示。

焊前对不锈钢管、铝管端面进行精车及抛光, 并对其表面进行机械及化学清理。将不锈钢管及铝管加热到 $200\sim 500^{\circ}\text{C}$, 将不锈钢管强力插入铝管中, 压入时的摩擦作用可破坏待连接表面的氧化膜。将组装好的工件连同夹具送入真空度为 $1.3\times 10^{-2}\text{Pa}$ 的热压炉中, 炉内气氛可防止待连接表面加热时进一步氧化。

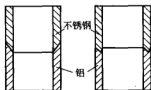


图 7.42 导管接头示意图

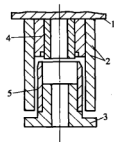


图 7.43 接头夹紧装置示意图

1—顶盖；2—衬套；3—底座；4—铝管；5—不锈钢管

将铝管和不锈钢管过渡接头加热到 $350\sim 400^{\circ}\text{C}$, 两管端部配合锥角控制在 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 之间, 最小搭接长度大于 4mm , 两管长度大于 30mm , 可形成致密牢固的焊接接头。此后, 用氩弧焊方法将过渡接头的铝管与铝管、不锈钢管与不锈钢管进行焊接。氩弧焊处距扩散焊接头在 30mm 以外时, 接头处的最高温度不超过 390°C , 氩弧焊不会影响扩散焊接头的性能。

扩散焊的导管过渡接头性能良好, 接头拉伸试件的断裂位置在铝管一侧, 弯曲角大于 120° , 已通过 $-196^{\circ}\text{C}\pm 100^{\circ}\text{C}$ 的反复交变冷热冲击试验 (20 次), $3\sim 4\text{MPa}$ 的液压强度试验、 15MPa 的气密性试验和氮质谱仪真空检漏试验 (漏气率小于 $10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{L/s}$)。对试件进行电子探针扫描分析, 发现接头界面间有一定的相互扩散。对试件断口进行扫描电镜分析结果表明, 在接头的近铝管一侧为韧性断裂, 在不锈钢一侧粘有铝。对接头断口两侧面进行 X 射线衍射分析结果表明, 接头的结合面上没有脆性的金属间化合物生成。

第 8 章 钎焊技术应用实例

由于钎焊是一种近乎无余量的加工方法,成本较低,可以实现多种复杂、精密构件的连接。因此它已经广泛应用于航空航天、能源电力、汽车制造、机械加工、电子电器等领域,并已成为工业产品不可或缺的连接技术之一。尤其是 20 世纪中期以后,随着世界航空航天、电子机械及能源科技的迅速发展,为满足特殊工况条件的要求,钎焊技术也得到了较快的发展和更广泛的应用。

8.1 在航空航天领域的应用

8.1.1 液体火箭发动机推力室的钎焊

大型液体火箭发动机推力室由头部喷注器、燃烧室身部和喷管三部分组成。目前世界上大型液体火箭发动机推力室按其燃烧室压力高低可分为中压($3\sim 7\text{MPa}$)和高压($7\sim 21\text{MPa}$)两种。前者一般采用波纹板夹层结构或管束式结构推力室,采用钎焊方法制造;后者美国通常采用铣槽式-电铸镍结构燃烧室,喷管采用钎焊的管束式结构。俄罗斯的铣槽式推力室都是采用真空扩散钎焊方法制造的。

(1) 喷注器组合件的炉中钎焊

它主要由几百个精密装配的喷嘴和上、下隔板等零件组成,靠近燃气处要经受 3000°C 高温,工作条件恶劣,材料一般为不锈钢或耐热合金。由于喷注器结构异常复杂,因此都采用先抽真空再充填流动的还原性气体的炉中钎焊,钎料多为锰基钎料或铜基钎料,其中锰基钎料的钎焊温度为 $1180^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$,钎焊保温时间为 $20\sim 30\text{min}$ 。钎焊的喷注器组合件如图 8.1 所示。

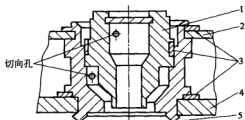


图 8.1 喷注器组合件示意图

1—喷嘴芯体；2—上隔板；3—钎料；
4—下隔板；5—喷嘴外壳

(2) 波纹板夹层结构推力室的真空钎焊

这里所指的波纹板夹层结构推力室实际上是燃烧室身部与喷管的组合件。它由内、外壁和波纹板三部分构成,见图 8.2,材料为 $1\text{Cr}18\text{Ni}9\text{Ti}$ 不锈钢,钎料为锰基合金,熔化温度为 $1035\sim 1080^{\circ}\text{C}$,钎料厚度为 0.12mm 。钎焊前,所有零件表面均酸洗镀镍,镀层厚 $8\sim 12\mu\text{m}$,采用高温真空(波纹板夹层中抽真空)钎焊工艺,钎焊温度 $1180^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$,钎焊保温时间 30min ,钎焊时波纹板夹层中的真空度不低于 6.65Pa 。波纹板夹层结构推力室结构简单,加工方便,前苏联所有中压燃烧室的液体火箭发动机(如 PД-107 、 PД-219 等)推力室均采用这种钎焊结构,并在 SS-6A 、 SS-9F 等系列运载火箭上获得应用。

(3) 管束式发动机推力室的炉中钎焊

管束式推力室较波纹板结构具有较轻的重量和较高的传热效率。推力室由几百根变截面管、承载外壳、加强箍等在气体保护的加热炉中钎焊而成。一次钎焊的钎缝可达几百条,长

近千米,制造工艺较波纹板层结构的要复杂得多。已钎焊好的管束式推力室如图 8.3 所示,基体材料为 1Cr18Ni9Ti 不锈钢,钎料为 BNi82CrSiB,钎料熔化温度为 970~999℃,钎焊温度为 1010~1100℃。表 8.1 为美国管束式发动机推力室钎焊结构所用的部分材料。



图 8.2 波纹板层结构



图 8.3 管束式结构推力室

表 8.1 美国管束式发动机推力室用材料

发动机型号	推力/ 10^4 kN	推进剂	推力室		钎料	钎焊设备
			材料	壁厚/mm		
LR-79	68	液氧/煤油	镍管	0.3	银基	手工
LR-93	135	液氧/煤油	镍管	0.28	银基	手工或煤气炉
LR-103	27.2	液氧/煤油	镍管	—	银基	手工或煤气炉
LR-87	195	N_2O_4 /混肼	T-347 型不锈钢	0.5	AMS4777(BNi82CrSiB)	煤气炉
LR-91	136	N_2O_4 /混肼	T-347 型不锈钢	0.5	AMS4777(BNi82CrSiB)	煤气炉
RL-10	6.8	液氧/液氢	T-347 型不锈钢	0.28	—	—
F-1	680	液氧/煤油	Inconel-750	0.6	金钎基	煤气炉
J-2	90	液氧/液氢	T-347 型不锈钢	0.3	Ag-10Pd Au-18Ni	炉中
SSME	213	液氧/液氢	喷管材料为 A-286	0.4	金基	炉中

(4) 铤槽式结构燃烧室和喷管的真空扩散钎焊

当燃烧室压力在 7MPa 以上时,为增加结构刚度和改善热效率,一般都采用铤槽式燃烧室,即在燃烧室内壁外表面加工出冷却槽道。在国外,内壁材料通常为 Cu-Ag-Zr 合金,外壁为电铸镍夹套,用 Inconel 718 合金外壳承受燃烧室的压力,喷管采用管束式钎焊结构。如美国航天飞机主发动机(SSME)的喷管就是采用 1086 根总长为 3292m 的 A-286 铁基高温合金锥形管与加强箍、Inconel 718 外壳、支管基体环等钎焊而成的。管端插入歧管钻孔处还有 2160 个钎焊接头。钎缝总长度超过 4277m。高压补燃的液体火箭发动机燃烧室为铤槽式电铸镍结构,喷管为管束式钎焊结构。

前苏联铤槽式推力室结构较简单,不采用管束式喷管,仅在燃烧室和喷管的内壁外表面铣出冷却液槽道,在燃烧室扩散段上部铣出螺旋形槽道,其下到喷管出口端均铣出直槽道。燃烧室内壁材料一般为铬青铜,外壁材料通常为耐热不锈钢。喷管内、外壁材料大多为耐热不锈钢,但也可用钛合金。它们在可用氩气加压特制的感应加热炉内进行扩散钎焊(铜与钢、钢与钢)或扩散焊(钛与钛)。炉内充氩加压时,最大压力可达 0.55MPa。燃烧室组装前,铬青铜内壁待焊处镀银,厚度为 8~10 μ m;耐热不锈钢外壁待焊处先镀 8~10 μ m 镍层,

再镀 $8\sim 12\mu\text{m}$ 铜层。将装配好的燃烧室（或喷管段）装在缓慢旋转的可抽真空的主轴上。加热前，燃烧室槽道和加热炉内均抽真空，真空度不低于 $1.33\times 10^{-2}\text{Pa}$ 。加热开始后，加热炉中充氦加压到 $0.16\sim 0.35\text{MPa}$ ，燃烧室槽道内仍保持抽真空，真空度不低于 $5\times 10^{-1}\text{Pa}$ 。扩散钎焊温度为 $950^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ ，保温时间为 $10\sim 20\text{min}$ 。内外壁在外压和加热的共同作用下，产生变形并贴紧，银、铜镀层相互扩散并熔化，冷却后形成牢固接头，接头的抗剪强度可达 175MPa 左右。也可采用锰、镍镀层进行扩散钎焊：首先在铜内壁的外表面镀锰，锰层厚度为 $12\sim 15\mu\text{m}$ ，再在耐热不锈钢外壁的内表面上镀镍，镍层厚度为 $10\sim 12\mu\text{m}$ 。扩散钎焊时，槽道内的真空度不低于 6.65Pa 。扩散钎焊温度为 $1010^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ ，保温时间为 10min ，感应加热炉的氦气压力为 $0.16\sim 0.35\text{MPa}$ ，接头抗拉强度可达 $200\sim 225\text{MPa}$ 。喷管内外壁为钛合金时，可不加镀层，直接在 950°C 、 0.35MPa 条件下进行扩散钎焊。

前苏联的铕槽式推力室已用于 PД-120、PД-0120、PД-170 和 PД-253 等型号的发动机上，并应用于质子号、天顶号和能源号等运载火箭。高压补燃、铕槽式推力室的 PД-170 液体火箭发动机的燃烧室压力达 25MPa 。

8.1.2 钛合金蜂窝壁板结构的真空钎焊

(1) 蜂窝壁板的结构

典型蜂窝壁板结构主要由 3 部分组成：上、下面板和蜂窝芯，其结构如图 8.4 所示。上、下面板及蜂窝芯体材料均为 TC4 钛合金，常用蜂窝芯格尺寸为 6.4mm ，芯格壁厚为 0.1mm ，芯格高度为 10mm ，面板厚度为 0.8mm ，如图 8.5 所示。

蜂窝壁板结构具有重量轻、比强度和比刚度、消音、隔热以及减振、防潮等优异性能，在飞机机身、机翼、发动机舱门等部位采用蜂窝壁板结构可以有效减轻飞机结构重量，提高结构效率，提高飞机机动性、灵活性。钛合金蜂窝壁板结构耐热性符合高温部位的要求，在较高的温度下可长期工作，具有较高的疲劳寿命和优良的耐腐蚀性能，可以提高结构的抗腐蚀能力和寿命，满足现代飞机在特殊环境条件下的使用要求。

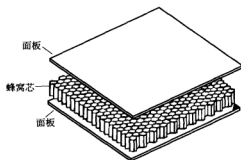


图 8.4 典型蜂窝壁板结构

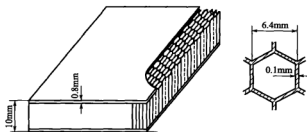


图 8.5 蜂窝壁板结构尺寸

(2) 蜂窝壁板的钎焊

① 对于钛合金蜂窝壁板结构的钎焊，常采用的钎料有银基钎料、铝基钎料及钛基钎料。银基钎料具有合适的熔点，钎缝具有良好的塑性，但钎焊接头高温强度低、抗腐蚀性能差。

铝基钎料价格便宜,熔点远远低于 β 相的转变温度,钎焊温度低,钎料流动性好,但其接头强度低、脆性大、疲劳强度低、不耐冲击。与银基、铝基钎料相比,钛基钎料钎焊接头高温强度高,耐蚀性、耐热性好。采用真空熔炼而成的非晶态箔状 Ti-Zr-Cu-Ni 钎料(熔点为 $820\sim 840^{\circ}\text{C}$),可以使 TC4 和 TC1 蜂窝壁板结构在相变温度以下 $40\sim 50^{\circ}\text{C}$ 进行钎焊,从而使基体在钎焊时不至于发生相变,保留了原始组织,保证接头的性能。

② 钎焊前对蜂窝芯体和上、下面板钎焊面进行清洗、打磨,去除表面氧化膜及油污等杂质,然后进行装配。控制蜂窝芯与面板间的装配间隙小于 0.1mm ,将蜂窝芯体及面板组成的蜂窝壁板结构放入真空钎焊炉中进行钎焊,钎焊过程中真空度不低于 $4\times 10^{-3}\text{Pa}$ 。

③ 根据钛合金材料的特点,为兼顾表面和内部裂纹的检测灵敏度,可以选择宽频带的涡流探伤仪进行裂纹检测。

8.1.3 航空压缩机扩压器的炉中钎焊

扩压器结构如图 8.6 所示,它由扩压器内外壳、轴向扩压叶片等 62 个零件焊接而成,零件材料为 1Cr11Ni2W2MoV。扩压器内、外壳与轴向扩压叶片钎焊后形成气流通道,对来流进行整流、扩压。扩压器内壳上有数控加工出的 37 个叶片,是气流的第一排整流叶片,其通道尺寸是影响产品性能的一个重要指标,质量必须得到保证。

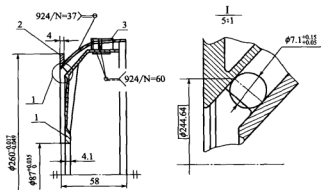


图 8.6 扩压器结构示意图

1—扩压器内壳;2—扩压器外壳;3—轴向扩压叶片

(1) 扩压器整体钎焊技术要求

- ① 钎缝符合 QJ 1156A-96II 级要求。
- ② 扩压器内、外壳 1Cr11Ni2W2MoV 材料为马氏体组织,经过热处理后硬度为 $269\sim 321\text{HB}$,因此钎焊后需要进行组织恢复。
- ③ 钎焊后保证气流通道尺寸 7.1mm 。

(2) 钎料的选择

采用铜基钎料 HBCu58MnCo,由于铜对钢的润湿性和填隙能力很好,以它作钎料时要求接头间隙很小,所以对零件的加工和装配提出严格的要求。扩压器内、外壳钎焊间隙要求不大于 0.06mm ,60个扩压叶片与叶型孔的间隙不大于 0.16mm 。

(3) 钎焊前处理

钎焊件应彻底清洗干净,不允许有锈蚀或油污的痕迹。钎焊件表面粗糙度符合设计图样要求,钎焊间隙符合工艺文件的规定,钎料填充位置正确,达到以上要求才可以进行钎焊。

采用钣金冲压方法制成钎料,厚度 0.3mm ,单边宽度 3mm ,沿着叶片形状加工,如图

8.7、图 8.8 所示。



图 8.7 第一排叶片钎料



图 8.8 扩压叶片钎料

将扩压器外壳放在托盘上进炉钎焊。扩压器内、外壳在工装上安装后，安装最初装配的 4 个扩压叶片，彼此相间 90° ，保证相应叶型孔的准确对应。叶片由外向内自由装入，不允许装配应力，如果不能自由装入，需要调整或修磨，确保叶片喉道尺寸及装配间隙。

(4) 钎焊后质量检验

由于受产品结构的限制，钎缝不能采用 X 射线检查，因而采用外观目视检查和煤油-白粉法检查密封性。钎缝合格的判据如下。

① 目视检查或用不超过 10 倍的放大镜、内窥镜检查钎缝的外观，钎缝表面连续致密，焊脚光滑均匀，不允许存在裂纹、针孔、未钎透，但允许存在少量、轻微的分散性疏松、节瘤、气孔和腐蚀斑点等缺陷。

② 对扩压器外壳与扩压叶片的钎缝进行煤油-白粉法检查其密封性，允许少于 10 个叶片有细微渗漏，每个叶片不多于两处。

在需要补钎的部位注射相同成分的膏状钎料（HBCu58MnCo），重新进炉按照钎焊工艺进行钎焊。补钎次数不超过 2 次。

8.1.4 7715D 钛合金喷注器的真空钎焊

7715D 钛合金是一种新型钛合金材料，其化学成分主要为 Ti、Al、Sn、Zr、Mo、Nb 以及 Se、Ce 等微量元素，室温抗拉强度为 1260MPa， 650°C 时抗拉强度可达 635MPa。航天某型号姿控发动机的喷注器所用材料为 7715D 钛合金，纵截面如图 8.9 所示。接头设计强度要求为：液压试验 6MPa，保持 5min；气密性试验 4MPa，保持 5min。

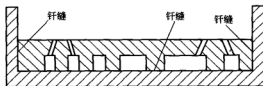


图 8.9 喷注器的结构纵截面示意图

采用真空钎焊方法进行 7715D 钛合金喷注器的连接。

(1) 钎料的选择

钛及其合金的钎焊，绝大多数采用银基或钛基钎料，银基钎料熔点较低，对铁的润湿性较好，但在钎缝界面区形成金属间化合物 TiAg ，降低了接头强度，故不宜用于接头强度要求较高的钎缝。Ti-Zr-Cu-Ni 系钎料的钎焊温度较低，所形成接头的抗剪切强度高，接头塑性及抗腐蚀性也较好。考虑到接头的设计强度，喷注器的钎焊采用 Ti-Zr-Cu-Ni 系钎料为宜。

钛基钎料很难加工成片，一般均以粉末状使用，这种粉末状钎料在钎焊时被预置于钎缝的间隙口颈部，熔化后靠毛细作用进入钎焊接头间隙填缝，因而不能用于图 8.9 所示的多通道、宽而深的夹层结构，且用量不易控制，易造成熔化钎料的流布不均匀，影响接头的性

能。利用速冷技术加工而成的箔状非晶态钎料（厚度为0.03~0.05mm），化学成分保持液态时的均匀性，杂质及气体含量极微，钎焊接头区域的元素和组织分布较均匀，而且钎焊工艺简单，实施方便，可按钎焊工件的要求冲裁成各种精确的形状，直接夹持装配在钎焊部位，保证填满间隙，并能严格控制钎料用量，避免液态钎料的溢流，形成接头的质量较高。

(2) 钎焊工艺

采用合适钎焊工艺参数，选择钎焊温度950℃，钎焊保温时间20min。对接头处施加一定的压力载荷，从而保证钎焊面在钎焊加热过程中贴合紧密，以形成致密的钎焊接头，并在钎焊后840℃适当保温一段时间，促进接头处母材与固态钎缝金属相互扩散，有利于接头强度的提高。

(3) 焊后检验

钎焊后的喷注器通过液压强度试验（6MPa）及气密性试验（4MPa），维持5min无泄漏，满足设计要求。

8.1.5 航空发动机燃油总管的感应钎焊

JT3D-3B发动机的燃油总管由两个半环组成，每个半环分布有4个喷嘴组合件，燃油通过总管的导管流到喷嘴组合件（每个喷嘴组件有6个喷嘴）并使燃油雾化。连续喷嘴组合件和喷嘴的管子是同轴的，材料为Inconel合金，焊前表面镀镍；喷嘴用管子和锻件为347型不锈钢（1Cr18Ni11Nb）。喷嘴组合件的钎焊采用纯铜作为钎料，钎焊温度为1121℃。喷嘴组合件的连接管钎焊采用Au-18Ni钎料，钎焊温度为1010℃，感应加热几分钟即可实现。感应加热装置的电流频率为10000Hz；保护气氛为97.5%Ar+2.5%H₂混合气体，露点为-70℃。

美国普拉特·惠特尼公司钎焊燃油总管以两个感应加热周期代替了30h的炉中钎焊。两个感应加热周期为：首先将喷嘴组合件进行感应钎焊，其次是将半环的大组合件钎焊，后者仅需几分钟。喷嘴组合件钎焊在一个可进行预热、钎焊、冷却和装卸的四工位装置上进行。钎焊用夹具是由无磁性的铝合金制造，充混合气体的容器采用黄铜材料。在保护气体控制系统中装有静电除尘器。感应加热器设计成两半个可分式结构，以形成围绕工件的磁场，钎焊过程是连续进行的。钎焊好的喷嘴组合件经液压试验合格后，与连接管、Au-18Ni钎料一起安装在钎夹具盘上，组装成燃油总管的半环，随后运送到另一个钎焊室中进行感应钎焊，钎焊温度为1010℃。可按半环所处不同位置（预热、钎焊、冷却、装卸）顺序，输入不同强度的热量。钎焊好的半环经液压试验合格后方可进行燃油总管总装。

8.1.6 发动机涡轮叶片的真空钎焊

某发动机涡轮叶片结构形式如图8.10所示，在叶片的锯齿冠上焊有2个耐磨片，耐磨片的尺寸为6.7mm×5.0mm×1.7mm。针对涡轮叶片结构特点，采用常规的真空钎焊方法，可实现耐磨片与叶片的连接。但由于真空钎焊时叶片为整体加热，易使叶片型面和榫齿部位产生变形，为防止叶片变形，可采用真空电弧钎焊的方法来实现涡轮叶片耐磨片的连接。

(1) 真空钎焊设备

真空电弧钎焊涡轮叶片锯齿冠耐磨片是在专用设备上完成的，该设备由真空室、焊接电源、真空泵系统和控制系统等组成。真空室中有2个焊枪（空心电极）、2个分度转盘，每个转盘上可放置44个叶片，设备的工作原理如图8.11所示。钎焊时由电极引弧对钎焊部位进行局部加热，使钎料熔化填充钎焊间隙，形成钎焊接头。真空电弧钎焊除具有真空气氛保

护叶片在钎焊过程中不被氧化的优点外,还有钎焊时对叶片进行的是局部加热,可防止叶片产生变形,同时每个叶片的钎焊时间较短,生产效率较高。

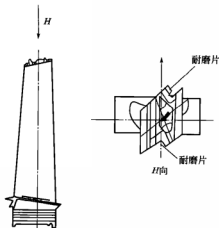


图 8.10 低压涡轮叶片结构

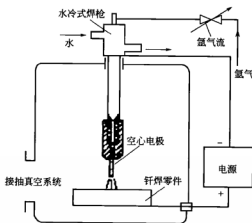


图 8.11 真空电弧钎焊设备工作原理

(2) 钎焊工艺流程

涡轮叶片锯齿冠耐磨片的真空钎焊工艺流程为：打磨→清洗→定位钎料→固定叶片和耐磨片→叶片装入设备的真空室→钎焊。涡轮叶片耐磨片的钎焊所用工艺：真空压力 $\leq 2 \times 10^{-2}$ Pa, 电流 7~30A, 电弧长度 10~30mm。

按上述工艺钎焊的涡轮叶片耐磨片如图 8.12 所示, 钎缝连续, 表面光洁, 钎焊圆角完整平滑。对钎焊接头截面进行检查, 钎缝连续、致密, 钎料填满钎焊间隙, 无裂纹、空穴和未焊透等缺陷。

为考核涡轮叶片耐磨片的钎焊质量, 将低压涡轮叶片放入专用夹具中, 进行耐磨片撕裂试验, 测得耐磨片去除时的剪切力大于 980N 规定值, 说明耐磨片的钎焊质量能够满足使用要求。

按上述工艺钎焊的某机低压涡轮叶片耐磨片, 安装在发动机上进行考核, 考核后叶片经外观检查, 耐磨片无明显磨损现象, 钎缝状态与考核前相同, 叶片经荧光检查后, 未发现钎缝有开裂现象, 钎焊质量可靠。

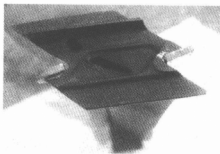


图 8.12 涡轮叶片耐磨片钎焊试样

8.1.7 航空发动机压气机静子环的炉中钎焊

航空发动机压气机静子环是发动机的关键部件。JT3D-3B 发动机已用于波音 707 客机和 B-52 重型轰炸机, 其压气机静子环 (4~7 级为低压、9~14 级为高压) 材料为 AISI410 不锈钢 (1Cr13), 叶片与内环的连接都采用炉中氢气保护钎焊工艺。4~7 级低压静子环采用厚度为 0.2mm 的 BAu-4 金镍钎料, 其成分为 Au82Ni18, 钎焊温度为 1010℃。上述材料加工成箔带状, 并与内环一样冲有型孔, 装配时夹在叶片与内环之间。钎焊在 Lindbecky 连续辊式氢气炉中进行。采用干燥氢的纯度为 99.94% 以上。对于高压静子环的钎焊周期为 4h±10min。为了使钎焊前钎焊件处于无应力状态, 采用刚性垫板进行装配。

8.2 在电力能源领域的应用

8.2.1 百万千瓦核发电机部件的钎焊

百万千瓦(1000MW)核电站汽轮发电机连接采用的钎焊技术种类较多、难度很大。其中包括定子线圈上、下层水电连接的氮气保护火焰钎焊,转子线圈的中频感应钎焊、转子导电杆柔性连接引线的大功率电阻钎焊,定子线圈绝缘引水管不锈钢水接头与紫铜导电块的高温镍基材料的真空钎焊,以及定子并联环的气体火焰与中频感应组合钎焊等。发电机钎焊部件都要求具有非常高的导电和密封性能,事先必须进行开发研究和试验验证。

(1) 中频感应钎焊

转子“C”形线圈的对接采用中频感应加热钎焊。这种大截面的钎焊,非常容易产生缺陷,并且由于线圈结构和探伤装备的制约,无法进行超声波探伤,这就对钎焊质量提出更高的要求。钎焊时必须在钎缝下面垫以不锈钢托片,以便保证“C”形线圈底面对接钎缝的成形。不锈钢片厚0.2mm,每钎焊一次就须更换,以免氧化后影响钎缝质量。钎焊过程中允许添加钎料,焊后立刻通风进行冷却,然后检查所有钎缝(下面部分采用反光镜检查),如有焊瘤,用平锉修平。在清理前,要用白布做成的托盘垫在线圈下面,用来收集磨屑,同时把棉条塞进转子线圈的通风槽里,然后用吸尘器清理,以免将磨屑撒到转子里。钎焊后只做外观检查。

按照要求,转子线圈的对接钎焊的钎缝间隙为零,很难达到,而且需要通过试件来确定要求的强度和钎透率。一系列试件的中频感应钎焊和拉伸试验表明:在小间隙范围内,钎料的填充率良好,拉伸时断裂发生在母材,颈缩明显。断口充满钎料,体现了良好的力学性能。钎焊间隙扩大后,力学性能明显下降,而且断口出现大量气孔,严重影响接头的导电性能和抗拉强度。因此必须在钎焊前严格测量间隙值。

除了转子“C”形线圈的对接以外,采用中频感应钎焊进行连接的部件还有转子极间连接线、转子匝间连接线等。

(2) 大功率电阻钎焊

电阻钎焊的部件有转子导电杆连接引线、“顶匝”和“底匝”连接块、顶匝双层线圈的封焊等,故采用自动电阻焊机,采用气动压紧、程序控制加热过程。

① 炭精块 定子并联环和主引线与顶匝线圈的钎焊,同样需要特殊定制的炭精块,并针对每一部件制作了特殊规格的炭精块。炭精块上置有沟槽,炭配时让沟槽压在钎缝上方,从而能够在钎焊过程中从沟槽观察和填料。在顶匝的层间和顶匝与引线之间的钎焊表面预置钎料片,在通过电阻加热进行钎焊的过程中,不能造成引线的退火,需要采取有效措施冷却引线的硬弯部位,并采用测量硬度的方式进行焊后检验。

② 柔性连接 柔性连接片的钎焊难度最高,需要保证很高的平整度(焊后要小于0.05mm)。当最大功率达到50kW以上时,要保证连接片不被熔化、层间钎透和有非常高的平整度,还要控制钎料的流动,不让钎料流出指定范围,以免造成软连接的柔性降低。在钎焊范围之外应涂敷“阻流剂”,阻流剂由 Mg_2O_3 调配而成,具有绝缘、耐高温等性能,是一种可以控制钎料流动范围的白色涂料。

(3) 真空钎焊

下层线圈连接块与绝缘引水管不锈钢水嘴连接采用的是真空钎焊。采用真空钎焊是因为上下层连接块的钎焊时,钎焊温度要达到800℃以上。如果是不锈钢与连接块钎焊,采用常规工艺(使用HLAgCu30-25钎料)就会发生重熔现象,因此要求钎焊温度控制在1010~

1175℃之间。

① 钎料的选择 要求采用 BNi-2 高温镍基钎料。虽然这种钎料对不锈钢具有很好的钎焊性,但对于紫铜则需要在苛刻的技术参数下,才能很好地填充钎缝。其技术参数包括:填料方式、工件氧化膜的去除、真空度设定、加热曲线、钎焊间隙、冷却方式等。真空钎焊对工件的清理要求非常严格,包括去除表面氧化皮和除油清洗。

BNi2 钎料的熔点为 999℃,最佳钎焊温度为 1010~1100℃,很接近紫铜的熔点 1080℃,这给大批量的钎焊生产带来很大的风险,控制不好温度容易造成大量废品。BNi2 钎料具有很高的钎焊强度,其供货状态有片状、粉末状。粉末状钎料需要使用黏结剂调制成膏状,采用注射方法填料。镍基粉末钎料的黏结剂必须具有良好的黏结效力、无毒性、无特殊气味、对人体无害、易于调膏、易于注射、能在较低的温度下完全挥发、不留任何残渣、不污染真空气氛等。调配好黏结剂后,再与粉末钎料进行充分搅拌后待用。

② 真空钎焊工艺 采用 BNi82CrSiB 钎料进行紫铜与 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢的真空钎焊(钎焊温度 1050℃、保温时间 10min)时,钎焊接头的组织结构依次为铜、铜镍固溶体、镍基固溶体、镍硼、铬硼、铁硼等共晶体以及不锈钢。大量的镍硼、铬硼、铁硼化合物可导致接头脆性的增大,强度降低,需要特别注意。

当钎焊间隙过大,会造成钎料流失或填充不充分,影响钎焊接头的质量;钎焊间隙过小,钎料在流动过程中,随着与母材的不断互熔,流动性降低,从而导致远距离处钎料的填充不充分,产生缺陷。一般采用的钎焊间隙为 0.02~0.04mm。

钎焊温度是钎焊过程中最主要的工艺参数之一。钎料要最大限度地充分液化、流动,并在毛细管作用下填满接头间隙,关键在于钎焊温度的选择。随着钎焊温度的提高,钎缝的抗拉强度也随之提高,但过高的温度也将增加铜母材熔化的风险,所以选择的钎焊温度为 1040~1050℃。

③ 焊后检验 焊后进行超声波探伤,标准为钎焊面积达到 70%以上,检验探伤合格率达 99%以上。

8.2.2 大型发电机定子绕组线棒的感应钎焊

某水电站 700MW 水轮发电机定子绕组线棒电接头是纯铜和不锈钢复合结构,绕组形式为双层条形绕组,绕组上下层线棒共计 1080 根。线棒的单根质量为 90 kg,由 42 股 2.12mm×13.5mm 包玻璃丝铜扁线和 6 股空心的不锈钢扁线组成,上、下层线棒结构如图 8.13 所示。

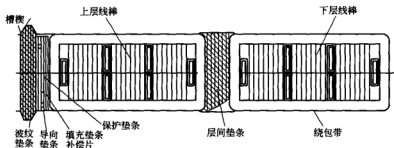


图 8.13 绕组上、下层线棒材料结构

(1) 线棒钎焊注意事项

线棒嵌入定子槽前,在线棒直线段缠绕半导体聚酯无纺布带。在对折的绕组带内填充充

当厚度的微膨胀半导体胶。嵌线时,在线棒直线段绕包填充含有硅胶化合物的半导体无纺布。线棒上下层之间安装电阻温度传感器(RTD)垫条和梯形截面的半导体垫条,槽楔下安装有波形弹性垫条。绕组端部斜边垫块及槽口垫块均采用环氧适形材料。由于线棒电接头的结构特殊,钎焊前后需要注意以下事项。

① 在调整电接头的平整度时,注意电接头的平行度和铜焊间隙,若出现偏差,应采用特别的夹具加以矫正。

② 电接头的调整过程中,要注意线棒端部不能受力过大,以免损伤端部绝缘和水管。

③ 由于线棒的部分材料结构如绕包布带及保护垫条等不耐高温,钎焊开始前应将剪成长条的湿布(不滴水为宜)缠绕在靠近线棒电接头端部绝缘上,以保护钎焊时线棒绝缘不受损伤。

④ 为防止钎焊时高温下端头水盒塑料帽受损,注意在钎焊前要取下线棒端头水盒上的塑料帽,同时要防止钎料杂物等落入水管中。

⑤ 在端部的上下层线棒间,用防火布堵严,防止上部接头钎焊时的残余钎料和钎焊后清理时的金属粉末进入定子铁芯或线棒间;下端钎焊时,将铁芯下端用胶布和防火布粘贴好,再将端部保护防火布上翻覆盖其表面,使钎焊时的火焰及烟气不影响铁芯及线棒,防止烟熏黑线棒端部。

定子绕组的钎焊顺序为:先钎焊定子绕组的线棒电接头,再按图样拼装定子主引出线、中性点引出线端子板,将绕组引出线端头钎焊在定子机座上端出口处。

(2) 钎料的选择

钎料为银焊丝和银焊片,银焊丝的型号规格为 L-Ag15P, $\phi 2\text{mm}$;助焊的银焊片成分含量与 L-Ag15P 相同,熔化温度为 710°C ,材料截面与电接头的尺寸相同。

(3) 钎焊工艺流程

① 钎焊前,调整线棒电接头的平整度,上、下层电接头的最大允许轴向偏差是电接头高度的 10%,但最多不能超过 4mm。切向偏差是电接头宽度的 10%,但最大不得超过 3mm,线棒电接头径向间隙超过 1.5mm 时必须插入铜垫片。

② 线棒上下端部用防火布等做好绝缘的隔热防护,防止高温烧伤线棒绝缘,上端部还要注意防止在加热过程中残余钎料和在接头焊后的清理中的金属颗粒落入定子铁芯和上、下层线棒之间。

③ 在上下层线棒电接头之间插入截面与电接头尺寸相同的银焊片,银焊片熔化温度为 710°C ,钎焊温度可达 740°C 左右,用 G 形夹将上下层线棒电接头夹紧,套入加热用感应线圈,并在钎焊接头的线棒另一端安装空冷装置。钎焊过程中可适当旋紧 G 形夹具,以减小径向间隙。

④ 调整好接头导电连接板,将其通电加热,当接头达到钎焊温度时(约 710°C),在钎缝中预放的焊片开始熔化,此时可迅速使用 $\phi 2\text{mm}$ 银焊丝(L-Ag15P)向钎缝中填加钎料,并在热态下将钎缝调直调平,使钎缝饱满,无气孔。钎焊后马上向被焊线棒内通干燥冷却空气。

⑤ 当钎缝全部被填满后,可停掉电源,在钎焊接头另一侧水接头上接入干燥压缩空气吹扫,加速接头冷却。为保证钎焊质量和钎缝的外观,可在停掉电源后的短时间内再次向钎缝填加钎料。如钎料过多时,应在未完全结晶(半熔状态)情况下,将过量的钎料拨掉,以减少焊瘤清理工作量。

⑥ 当电接头达到室温后,重新盖上线棒端头水盒塑料帽。

⑦ 钎焊后,用锉刀、砂布、电磨头清除接头表面的钎料、焊瘤及氧化物,再用丙酮、

白布擦洗干净后进行钎焊质量检验。

⑧ 对于不合格的接头必须重新钎焊，接头重焊不超过2次。

⑨ 接头钎焊合格后，拆除湿布等防护设施，并彻底清理干净线棒。

绕组引出线端头的钎焊工艺流程与此基本相同。

(4) 焊后检验

用5~10倍放大镜作外观检查，钎缝中间的钎料饱满，呈现出“R”形，没有出现凹陷现象；表面没有出现直径1mm以上的气孔。进行52kV、保持1min的工频交流电耐压试验，以及压力试验和抗拉试验。经检查和检测，接头直流电阻最大与最小值之比小于1.2，各相各分支的直流电阻相互间差别小于最小值的1%；线棒电接头的抗拉强度大于180MPa，达到水轮发电机定子绕组的电气性能指标和力学性能要求。

8.2.3 500MW 汽轮发电机水盒的钎焊

(1) 水盒的结构

某500MW汽轮发电机组的定子线圈、引线均采用水冷结构，其定子线圈端部、水盒结构如图8.14所示。线圈由空心导线与实心导线组成，空心导线长于实心导线；水盒与线圈装配后尺寸大、结构复杂，不易钎焊。

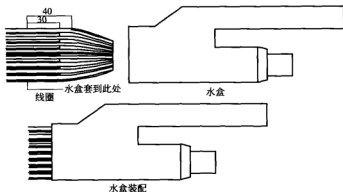


图 8.14 定子线圈端部、水盒结构

该汽轮发电机线圈与水盒材料均为紫铜，定子线圈与水盒装配只有实心导线之间、实心导线与空心导线之间、空心导线与空心导线之间、空心导线与水盒之间、实心导线与水盒之间均填满钎料，才能保证气密检验和超声波探伤合格。由于导线之间的间隙、导线与水盒之间的间隙大小不均，受条件限制，水盒只能采用小空间位置施焊，钎焊性较差。

(2) 水盒钎焊设计

根据水盒钎焊装配特点及钎焊性，采用将线圈端部钎焊为一实体，将钎焊后的线圈与水盒装配好，再进行水盒钎焊的方法。其具体工艺为：采用中频感应加热方法将线圈端部实线股线40mm范围钎焊为一实体，股线之间填满钎料。线圈与水盒装配好后，再用火焰加热方法进行水盒钎焊。

(3) 线圈的中频感应钎焊

选择功率、电流、电压可调的中频电源。设计一套钎焊专用双平面感应线圈。线圈长度为1.5m，钎焊长度为40mm。线圈放在平台上，一端固定，另一端悬空，悬空一端每股线用砂布打磨至紫铜本来颜色，用白布蘸酒精擦拭干净。将线圈端部按图8.14剪断、修形，确保空心导线不堵塞。所选钎料牌号为HLAgCu80-5，尺寸为40mm×0.4mm×线圈宽度。

按图 8.15 将钎焊专用双平面感应线圈夹在线圈钎焊部位的两侧,在感应线圈和线圈之间放入石棉板。在线圈待焊部位和石棉板之间各放一片钎料,排间放两片钎料,使之与线圈的上下面和实心端部对齐。在感应线圈和钎焊固定夹紧工具(此工具作用是确定线圈端部几何尺寸,钎焊时施加压力)之间放入绝缘板。旋转夹紧工具顶丝,将线圈压紧。接通电源,启动感应加热设备。

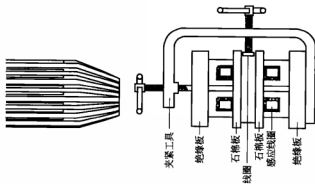


图 8.15 封焊专用双平面感应线圈的装配

在交变磁场作用下,线圈温度升高,观察线圈端部。当加热到钎料开始熔化后,必须再次拧紧感应线圈夹紧工具,采用间歇通电法,温度维持在钎焊参数范围内。当钎料完全熔化后,立即断电,避免加热温度过高,造成钎料的流失。



图 8.16 钎焊好的水箱产品

(4) 水箱的火焰钎焊

对于所有连接好的线圈钎焊面,用角向砂轮机的钢丝刷打光,水箱钎焊面用砂纸或钢丝刷打光,用白布蘸酒精擦干净。按图 8.14 所示进行水箱的装配。

将装配好的水箱放在支架上,用乙炔火焰进行加热,达到钎料熔化温度时填加钎料。先向水箱板的两侧钎缝填加钎料,待两侧钎缝钎料填满后,再对上侧和下侧钎缝进行钎焊。为了确保钎焊质量和良好的钎缝外观,所有钎缝填满并呈“R”形时停止钎焊。

感应钎焊后的线圈和火焰钎焊好的水箱如图 8.16 所示。钎焊后的水箱进行气密性检验合格,经超声波检测,钎焊面积达 85%,钎焊质量良好。

8.2.4 电站汽轮机顶轴油管的火焰钎焊

某 4×200MW 电站机组汽轮机顶轴油管的作用是将压力为 16MPa 的油送入到轴瓦内将汽轮机大轴顶起。该油管的最后一个接头设计前端为 $\phi 14\text{mm} \times 2\text{mm}$ 的不锈钢管接头,后端为 $\phi 8\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ 的紫铜管,通过钎焊方式连接。由于两种材料的物理化学性能不同,在连接性能等方面差异很大,要进行紫铜和不锈钢异种材料的连接,存在一定困难。采用氧-乙炔火焰钎焊方法方便、经济,能够保证连接质量。

(1) 钎料选择

根据顶轴油管的材质和钎焊特点、工况,选用 HL306 钎料、QJ103 钎剂。

(2) 钎焊前处理

对管子内外壁的油污及氧化物薄膜进行清除,由于工作量小,可选择采用锉刀、砂纸等方法。

(3) 钎焊间隙的确定

由于一般钎焊接头强度较低,而且对装配间隙要求较高,故采用管子套接形式,小管端头向外翻边,翻边直径与大管内径相同,可以通过锉刀修磨来实现,翻边圆与大管内径配合间隙越小越好,以防止钎料在钎焊时由此处流失,造成管子堵塞。接头形式如图 8.17 所示。由于钎焊接头的形成主要依靠毛细作用,而影响毛细作用的主要因素是钎焊间隙。间隙太小,妨碍钎料流入;间隙太大,破坏了毛细作用,都使钎料不能填满间隙。因此,钎焊接头预留间隙的大小和均匀程度直接地决定了接头的致密性和强度。

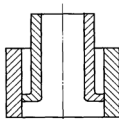


图 8.17 顶轴油管接头形式

(4) 钎焊工艺

① 内套管插入长度 15~20mm,然后将上下管子固定,并将内套管调整到中心部位,使得周围钎焊间隙均匀,以利于钎料分布均匀。由于选用的钎料是 HL306 银钎料,钎剂 QJ103,熔点分别是 685~720℃ 和 550~750℃,因此钎焊温度范围可选择 800~820℃。

② 加热前将钎剂放入钎缝少许,以利于在加热过程中溶解和破坏钎焊金属表面形成的氧化膜。

③ 焊件加热时加热范围要比套管插入的长度稍大一些,使钎料能顺利到达根部,同时加热时要顾全到内套管,整个加热过程要求加热温度均匀,观察金属颜色变化或用红外线测温仪测温,并用钎料丝配合钎剂试探性地填加钎料,如果流动性好,填丝顺利,说明温度合适,否则,应继续均匀加热。

④ 当加热温度合适后,用气焊火焰将钎焊丝端头稍加热,插入钎剂中,黏着钎剂。沿内套管上口将钎焊丝熔化,填入接头间隙。也可以在不同的部位加入钎料,为了防止钎料氧化,要配以合适的钎剂。当钎料填满接头后,用火焰在插入长度的二分之一处适当加热,观察接头表面钎料是否有下沉现象,如有下沉,说明钎焊间隙还没填满,应适当加热,继续加入钎料。

⑤ 为防止裂纹的产生,在钎焊过程中,管子不能振动,特别是在凝固过程中,轻微的外力都有可能导致裂纹的出现。

⑥ 焊后的清理一般用钢丝除去钎剂残留物或用小锤轻轻敲击即可。除去表面残留物后,检查表面有无缺陷,如有则及时清除。

8.2.5 HT-7 装置纵场线圈超导导线接头的火焰钎焊

HT-7 装置纵场线圈的超导母排是由铜基 NbTi 超导导线构成,具体结构为:9 根 $\phi 3\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ 的紫铜管平排在一起,在两个相邻铜管之间的两侧各有一组 NbTi 超导导线,超导导线总截面积为 6mm^2 ,最后在 9 根铜管及超导导线外电沉积一层铜,由此构成截面 $28\text{mm} \times 4\text{mm}$ 的超导母排(见图 8.18)。

超导导线的连接方法可采用冷压焊和软钎焊。搭接钎焊接头设计如图 8.19 所示。

(1) 钎焊结构设计

由于超导母排表面粗糙,并带有纵向条纹沟槽,造成接头的两个搭接面的间隙不均匀,钎料层的厚度也不均匀。另外,HT-7 装置很大,总重 33t,而接头钎焊必须在纵场组装后进行,因此导致钎焊位置操作不方便。为确保接头的钎焊质量,可采取如下措施。

① 在钎焊好的接头两个侧面各放一组 NbTi 超导导线,每组由 13 根 $\phi 0.75\text{mm}$ 的铜基



图 8.18 HT-7 超导母排

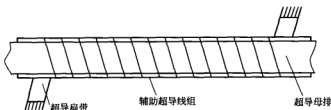


图 8.19 超导钎焊接头结构示意图

NbTi 线组成，长度比接头搭接长度长 10% 左右。

② 用厚 0.8mm、宽 10mm 的超导扁带将搭接的超导母排和两组辅助超导线一起包绕起来，钎焊好。包绕的目的是提高接头的抗拉强度和增加钎焊面积，这是提高接头质量的重要手段。

③ 在空间许可的情况下，增加钎焊搭接长度，长度一般在 250~280mm，这也是为了增加钎焊面积，从而降低接头的接触电阻。

(2) 钎料选择

考虑到 NbTi 超导线的失效温度在 350℃ 附近，宜采用低温钎料，其成分为：50%Sn，30%Pb，20%Cd，钎料的熔化温度为 128℃。采用专门配置的以松香为基加少量活性剂的膏状钎剂，它的腐蚀性小、便于清洗。

(3) 钎焊前处理

超导母排钎焊表面用不锈钢丝刷清理表面氧化膜，直至露出原金属的颜色，再用丙酮或酒精擦除表面油污和其他残留物。

(4) 钎焊工艺

① 预涂钎剂和钎料 在已清理干净的焊件表面用毛刷涂上一薄层钎剂，所用的钎料也涂上一薄层钎剂。在钎焊面上预先敷上一层钎料，冷至室温后再涂少量钎剂，搭接好，并用不锈钢夹夹紧、贴实、钎焊。在接头两侧各放一组辅助超导线，再用超导扁带将搭接好的超导母排与两组辅助超导线包绕起来，并用不锈钢夹夹紧，进行第二次施焊。所有钎焊过程必须保证钎料的润湿，严格控制钎焊温度。

钎焊面上预涂钎料后，如果放置时间过长，在进行下道工序前必须用不锈钢丝刷刷去表面氧化层。因为放置时间过长，钎料会被带有活性剂的钎剂和空气氧化而形成一层氧化膜，造成在施焊时钎料不润湿的现象。

② 施焊 由于接头离纵场线圈盒很近，难以采用其他可控温的加热器加热，只好采用火焰加热，且宜采用氢气火焰。施焊时火焰不宜集中，还要均匀移动，目的是增大受加热面，避免局部过热，待达到钎料熔化温度时，便可随时添加钎料。如果表面钎料涂敷不均或过多，可用羊毛毡快速拖平，同时去掉多余的钎料。

③ 钎焊温度的测量和控制 由于 NbTi 超导线的失效温度在 350℃ 左右，所以施焊过程中应把温度控制在 128~200℃。现场施焊的温度采用热电偶测量，但考虑到使用火焰加热，

热电偶必须用陶瓷或石英管套起来放到被测部位, 裸露在外面的部分包上一层较厚的隔热层, 否则火焰直接接触热电偶, 测出的温度不能反映工件的真实温度。

接头钎焊好后, 清除残留的钎剂, 防止腐蚀。

8.2.6 水轮发电机定子线圈端部的感应钎焊

某水电站的立式水轮发电机定子分为两瓣, 内径 3.38m, 单机容量 30MW, 为条式波绕组, 端部采用并头板式钎焊连接。接头绝缘采用云母带加包合搭接长度后, 装入绝缘盒结构。

(1) 定子绕组并头的结构

水轮发电机条式波绕组同槽上、下线棒端头连接, 采用直并头套是这种定子类型机组最常用的连接方式。直并头套典型的连接结构有无底直并头套、盒型并头套, 股线对接于并头套内, 铜板连接, 端头股线搭接。该电站选用的是盒型并头套, 铜板连接, 即将铜板直接与线棒上、下层端头连接; 相邻上、下层线棒端头间进行连接; 极间连接线连接不同极性下的同层线棒端头, 采用铜母线制成, 见图 8.20。

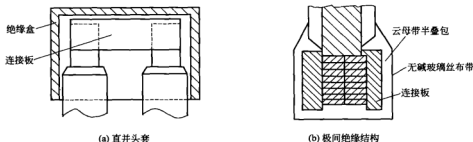


图 8.20 绕组并头结构

绕组并头采用钎焊连接, 保证质量的关键在于加热温度和钎焊时间的控制。如果温度过高, 钎料流动性太强, 对母材的熔蚀加重, 引起过烧, 使钎焊金属晶粒长大, 导致钎缝组织疏松、强度降低等现象; 温度过低时, 钎焊时间过长, 线棒端部绝缘容易烧坏。因此, 在整个钎焊过程中, 必须保证冷却水的畅通, 并随时注意冷却水的温度保持, 若温度过高, 如出水有汽化现象, 应立即停机检查冷却水压, 并检查水路是否畅通。

(2) 钎焊工艺

根据并头的结构及其焊接性, 采用中频感应钎焊方法进行连接。

首先要做好防护措施: 用浸水的石棉 (以不滴水为宜) 缠好线棒端部靠近钎焊部分的绝缘, 沿定子整圆在上、下层线棒之间, 及相邻线棒间, 用石棉布塞紧, 同时为防止掉落多余的钎料, 施焊处地上应铺好石棉布。

将感应线圈和并头板一同夹紧, 先通冷却水, 再通电加热, 在交变磁场作用下, 并头板温度升高, 银铜钎料片逐渐熔化后, 继续旋紧夹紧工具, 必要时可采用多用夹钳辅助夹紧, 以保证发热均匀, 迅速对并头板下部的钎缝添加钎料, 直至钎缝填满后, 再对上部钎缝和立缝进行钎焊。

为保证钎焊质量和钎缝的外观, 可在停掉电源后的短时间内, 再次向钎缝添加钎料。加热钎焊过程中应防止温度过高造成并头板熔化, 烧坏线圈, 应尽量使线棒接头在最短的时间内达到钎焊温度 (表现为并头板均匀发热成深红色)。如有发白的亮点, 表明局部温度已超过 1000℃, 而并头铜板的熔化温度为 1080℃, 若继续升温, 将烧坏线圈和并头板, 应立即停止加热。钎焊完毕, 待温度降至 400℃左右, 即可拆卸感应圈及夹紧工具, 进行下一个接头的钎焊。

8.3 在汽车制造中的应用

8.3.1 铝制板翅式换热器的钎焊

铝制板翅式换热器是汽车关键部件之一，用于汽车发动机机油的冷却和无级变速液力变扭器机油的冷却。它是延长发动机寿命、提高发动机功率、保证汽车安全性的主要装备。成本低、轻量化的铝制换热器正逐步取代传统的铜制和不锈钢制换热器，成为汽车用换热器的主流。最初的换热器采用机械加工的方法，利用盐浴浸渍钎焊方法生产和制造。随着科学技术的发展，真空钎焊技术成为铝制换热器生产的重要方法。

(1) 盐浴浸渍钎焊

铝制板翅式换热器具有传热效率高、结构轻巧紧凑等优点，逐渐取代了铜管式换热器，广泛应用于石油化工、车辆、制冷设备等领域。图 8.21 为典型的铝制板翅式换热器的钎焊结构，它由隔板、封条及波纹板等组成，全部材料采用防锈铝合金 3A21 (LF21)。钎料牌号 HLAlSi7.5 (熔化温度 577~612℃)，钎料可制成薄片状铺放在隔板上。多数情况下，可采用轧制方法将钎料复合于隔板上制成双金属板，这样可简化装配工艺。

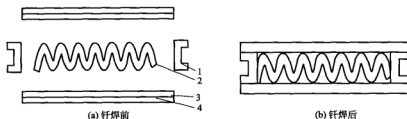


图 8.21 铝制板翅式换热器的钎焊结构

1—封条；2—波纹板；3—钎料；4—隔板

钎焊前，必须清除零件表面的油污和氧化膜。为此，零件先在 3%~5% Na_2CO_3 、2%~6% 601 洗涤剂（25% 正烷基磺酸钠的水溶液）的混合液中去油；接着在 5%~10% NaOH 溶液中去氧化膜和 20%~40% HNO_3 溶液中进行中和处理，然后用流动清水洗净并烘干。清洗好的零件在夹具中装配成所要求的结构，例如外形尺寸为 710mm×750mm×2100mm 的可逆式换热器，共计 66 层。将装配好的焊件在功率为 150kW 的预热炉中预热到 560℃，保温 3h。预热的目的是提高焊件进入盐浴炉的温度，防止钎剂凝固阻塞焊件中的钎缝通道和缩短钎焊浸渍时间。

盐浴槽中钎剂的成分为：34% LiCl ，44% KCl ，12% NaCl ，10% $\text{KF} \cdot \text{AlF}_3$ （熔点 480~612℃）。

工件预热完毕，立即浸入温度保持在 615℃ 的盐浴槽中进行钎焊。这时，盐浴既是导热的介质，把工件加热到钎焊温度，又是钎焊过程中的钎剂。盐浴槽是电极式盐浴电阻炉，盐浴槽的尺寸为 3200mm×1300mm×1400mm，功率为 250kW。

钎焊时，采用三次浸渍工艺：第一次工件以 30° 左右倾斜浸入，浸入速度适当放慢，以利于空气泡排出；待工件全部浸入，再把工件放平；保持 4min 后，工件从另一端以 30° 吊起离开盐浴面，待钎剂大部分排出后再第二次浸入；如此三次浸渍。第一次 4min，第二次 2min，第三次 4min。工件在盐浴中的加热时间共 10min。最后一次倒盐，应尽量将工件中的钎剂排尽。

钎焊完毕,工件在空气中冷却90min,待工件中心温度降到200~300℃时,即可在沸水中速冷,其后的清洗过程如表8.2所示。

表 8.2 钎焊后的清洗过程

工序	清洗液	时间/min	温度/℃
1	浸入热水槽速冷	2~5	>80
2	循环水冲洗	240~280	>60
3	2%~4%草酸,1%~4%氯化钠,2%~4%601洗涤剂(烷基磺酸钠)	5~20	室温
4	循环水冲洗	10~30	>60
5	10%~20%硝酸	5~10	>60
6	循环水冲洗	5~30	>60
7	1.1%铬酸,1.9%硼酸,1.9%氟硅酸钠	1~5	室温
8	循环水冲洗	10~30	>60

对钎焊后的产品进行彻底清洗,去除任何钎剂痕迹,直到倒出各通道内存水的氯离子含量能通过“盐雾试验”(在100mL水中硝酸银消耗量不高于自来水的1.5mL)。接着用加热的空气干燥,最后进行渗漏试验。这种换热器的设计压力为0.6MPa。

(2) 真空钎焊

汽车用铝制换热器的制造技术发展很快,对新材料的需求也相应增加。采用先进的真空焊接设备,对新型LT-3复合板铝制板翅式换热器真空钎焊工艺及接头性能的试验研究取得了很好的效果,使铝制换热器的生产更适应汽车工业大批量、高质量、低成本发展的要求。

LT-3铝板是专用于真空钎焊的三层复合材料,换热器翅片为防锈铝LF21,两端的引出接头为7005铝合金。LT-3铝复合板材的芯层为3003合金(LF21),皮层为4004合金,包覆率10%~13%。皮层在真空钎焊中熔化起钎料的作用。LT-3铝复合板材皮层、芯层及引出接头的化学成分见表8.3,芯层的力学性能见表8.4。

表 8.3 LT-3 铝复合板及引出接头的化学成分

材 料	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Al
芯层(3003)	0.6	0.7	0.05~0.2	1.0~1.5	—	0.1	余量
皮层(4004)	9.0~10.5	0.8	0.25	0.1	1.0~2.0	0.2	余量
引出接头(7005)	0.35	0.40	0.10	0.50	1.4	4.5	余量

表 8.4 LT-3 铝复合板芯层的力学性能

材料	固相线/℃	液相线/℃	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	抗蚀性
芯层(3003)	643	654	110	42	30	良好

为了保证铝制板翅式换热器的使用性能,换热器的接头设计是一个重要的环节。铝制换热器的外观示意图如图8.22所示。翅片和板材的接触部位①、垫片和板材的接触部位②、接头和板材的接触部位③,以及两片板材的接触部位④(图8.23),采用真空钎焊技术一次连接成形。铝制换热器每一层都是由两片单独的LT-3板材经钎焊后形成的,中间部位是一个空腔,便于冷却水或油从中间流过。

单片板材的结构示意图见图8.23。这种接头设计有利于在换热器使用过程中冷却液在中间空腔中流动,但由于在LT-3板材与翅片之间、板材之间、板材与接头之间有多数的钎

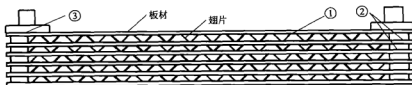


图 8.22 铝制板翅式换热器外观示意图 (图中①、②、③为钎缝部位)

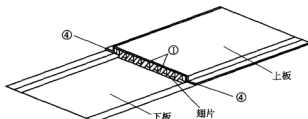


图 8.23 LT-3 单片板材的结构示意图

焊接头，这些接头极易在钎焊过程中出现局部未焊合的现象。焊前装配时翅片与板材应接触紧密，保证装配质量。

真空钎焊在真空炉中进行。铝制板翅式换热器的生产工艺流程为：板材、翅片轧制成形→板材翅片表面清洗→组合装配→真空钎焊→质量检验。

结果表明，铝制板翅式换热器采用真空钎焊技术可一次焊接成形。钎焊工艺参数是加热温度 $610\sim 630^{\circ}\text{C}$ ，保温时间 $6\sim 10\text{min}$ ，真空度 $2.5\times 10^{-4}\text{Pa}$ ，钎焊接头经水压试验可达到 15kgf/cm^2 ，满足接头质量的使用要求。

(3) 换热器铜管的火焰钎焊

换热器用小口径紫铜管，钎焊间隙很小，钎料难以填满钎缝。

① 钎料的选择 应根据钎焊接头的使用要求和母材的种类来选择合适的钎料和钎剂，对于管径小的紫铜管钎焊，应采用流动性能好、导热性好，能充分发挥毛细作用的钎料，为此选用 B-Cu89PAg 低银铜磷钎料。该钎料含磷 $5.8\%\sim 7\%$ 、银 $4.8\%\sim 5.2\%$ ，其余为铜。磷加入铜中具有两个作用：一是降低钎料熔点；二是银、磷可以还原氧化铜和氧化银，还原后的五氧化二磷与氧化铜形成复合化合物，在钎焊温度下呈液态覆盖于金属表面，防止金属继续氧化，具有自钎剂的作用。银的加入也可以降低熔点，提高钎焊接头抗拉强度，低银铜磷钎料的熔点低，流动性能好，能充分发挥毛细作用而填满间隙。

② 钎焊工艺

a. 钎焊前除去换热管钎焊端面油污、杂物，用细砂布擦去氧化皮，再用酒精、丙酮等有机溶剂清洗，最后用毛巾擦干，立即进行钎焊，以避免焊件在常温下发生氧化。为保证钎焊接头间隙，钎焊接头的接合面粗糙度一般在 $Ra\ 6.3\mu\text{m}$ 左右。

b. 钎焊接头预留间隙的大小与母材和选用钎料的种类，以及钎焊方法、钎焊温度和钎料的安装方式均有关。

c. 钎焊接头装配时，接头形式为插入式，可采用专用的扩口器将换热芯组铜管束两端扩口，按要求将铜管弯件连接至芯组管束内，连接应由内到外分次进行，待内部施焊完毕方可连接外部。

d. 钎焊前要进行预热，预热温度根据管径和壁厚大小而定，一般预热至暗红色为合适，

一般为450℃左右。

e. 热源采用氧、乙炔气体,中性火焰或轻微的碳化焰,淡蓝色的中性焰适于紫铜和黄铜及紫铜和紫铜的接头。采用双嘴钳式焊炬:焊丝直径 $\phi 2\text{mm}$ 、焊嘴规格H01-2、乙炔流量 $100\sim 140\text{L/h}\pm 10\%$,钎焊时均匀加热,温度控制在 $650\sim 750^\circ\text{C}$ 之间(焊件呈橘红色)。在钎焊过程中,先用外焰离外管件 $12\sim 25\text{mm}$ 处加热外管件,必须用外焰加热钎焊件,内焰应离钎焊件 $18\sim 25\text{mm}$,如换热管的管径较小,焊炬火焰可以同时包围内管件和外管件,以尽可能均匀的速度加热至钎焊温度,这样可以防止热斑的出现及接头过热或加热不足,当紫铜变成橘红时,表明已达到钎焊温度;如变得鲜红,则金属已过热。

f. 施加钎料时必须保持钎料清洁,不干净或受腐蚀的钎料会在接头区域产生夹杂。熔化的钎料会向高温区域流动,达到钎焊温度才可在紧挨接头处填加钎料。

g. 钎焊完成后,将焊件置于净水中,以免焊件在高温条件下被氧化,并用水、毛刷把残留在钎缝表面的熔渣清理干净,最后用压缩空气将其吹干。

③ 焊后质量检验

a. 外观检验:检查钎缝外观,所形成的角焊缝是否饱满、过渡圆滑、美观;钎缝表面有无裂纹、气孔、咬边和未钎合等缺陷。

b. 无损检验:着色检验和荧光检验两种方法主要用来检查因外观检查发现不了的微小裂纹、气孔、疏松等缺陷;射线探伤或超声波检验用来判定接头内部的气孔、夹渣、未钎透等缺陷。

c. 密封性检验:水压检验适用于高压容器密封性检验,气压检验适用于低压容器密封性检验,煤油检验适用于不受压容器的密封性检验。

8.3.2 大型热交换器的埋丝钎焊

大型汽车用热交换器是制造工艺复杂的硬钎焊件,主要由铜管束、铜管板、端头和壳体组成($\phi 250\text{mm}$ 范围内可分布500多个 $\phi 6\text{mm}\times 1\text{mm}$ 的管束,管间距仅 $1\sim 2\text{mm}$ 、长度 $0.6\sim 1.2\text{m}$,根据车型确定)。由于其管束多、管间距小而且整体尺寸较长,故采用一般的钎焊工艺,设备比较复杂,生产成本较高,给生产带来一定的困难。可考虑采用埋丝钎焊,所谓的埋丝钎焊,是采用大量的钎剂,把钎料充分埋起来,整个钎焊过程是在与空气隔绝状态下进行的。这样不但能够起到彻底清洗钎缝的作用,还能很好地对加热表面起防止氧化的作用。

汽车热交换器是在几个大气压的状态下工作的,因此钎缝不仅要有很高的强度,还要有很高的密封性。要保证钎缝的质量,必须采用合理的工艺。

(1) 钎焊设备

由于热交换器的工艺要求,在两端部铜管板与铜管束相配合处需钎焊密封,采取两端分别局部加热方法;设备选用圆筒式专用电炉,其内径及高度为 $\phi 800\text{mm}\times 600\text{mm}$ 。为了使加热均匀,在炉体圆周内壁及顶部均匀分布加热电阻丝(倒立炉体加热),根据加热速度的需要,功率应选 20kW ,顶部设有安装炉体热电偶的插孔及吊装环以便测温、观察及吊装移动(见图8.24),其结构简单,安装方便,成本价格低廉,尤其适用于中、小

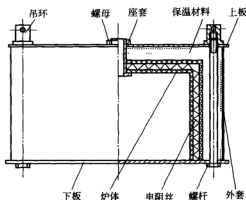


图8.24 侧立炉体

批量生产。

(2) 钎料、钎剂的选择

从钎料和母材的相互匹配、钎焊件的使用工况要求、现有设备条件以及经济等方面进行综合考虑,对于热交换器的钎焊采用银基钎料比较适合,其牌号及参数见表 8.5。

表 8.5 银基钎料的化学成分(质量分数)

						%	
AWS	Ag	Cu	Zn	Cd	固相线温度/℃	液相线温度/℃	钎焊温度/℃
BAg-1	44~46	14~16	14~18	23~25	605	618	618~760
BAG-1a	49~51	14.5~16.5	14.5~18.5	17~19	627	635	635~760

因为电炉加热时,加热速度较慢,加热过程中钎料熔化之前,必须防止钎焊表面氧化,这就要求对钎剂一定要分段熔化,以达到在钎料熔化之前钎剂就已熔化并开始起作用,从而达到去除钎缝间隙和钎料表面氧化膜的目的,为液态钎料铺展润湿创造条件。钎剂应选用脱水硼砂($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$)和氟硼酸钾(KBF_4)等的混合物,其中 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 质量分数为25%~30%,熔点741℃; KBF_4 占70%~75%,熔点530℃。

钎焊温度550~850℃,其中硼砂溶解金属氧化物,是因为与金属氧化物形成偏硼酸钠与硼酸盐 $[\text{CuO} + \text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \longrightarrow 2\text{NaBO}_2 + \text{Cu}(\text{BO}_2)_2 \downarrow]$,从而形成熔点更低、更活泼的混合物($\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3$),达到去除氧化物的目的,故可用其作为钎剂。为了使钎剂得到合适的熔点,增强去除氧化物的能力,添加氟硼酸钾(KBF_4)与硼砂混合使用,并将钎剂制成粉状进行均匀搅拌,使钎剂在熔化状态下分段均匀熔化,可使其流动速度更快,更好地溶解氧化物。

(3) 焊前准备

焊件加工管板与端头是异种材料连接(管板为铜板、端头为 Q235 钢板),由于其配合尺寸较大(250mm),为了保证焊件的密封和压力要求,考虑金属再结晶处理对接头间隙的影响,宜事先采用铜合金焊丝(HS220,熔点860℃)气焊方法,将管板和端头连接在一起(见图 8.25),然后再进行管板上孔的加工。

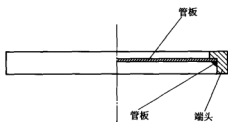


图 8.25 管板与端头连接示意图

装配后的焊件应竖直放置,用水平仪找正端头端面,并将环状焊丝套入铜管束端头。为防止大量的钎剂外流,需要在铜管束端口用石墨芯棒进行堵塞,并在端头上端另加 20mm 厚圆环钢套,增加钎剂的容量,使钎剂完全覆盖钎焊部位,达到彻底清洗钎缝、提高钎料填充钎缝能力的目的,钎料钎剂放置位置如图 8.26 所示。

倒立炉体的放置,需要支撑架支撑,采用活动保温材料及砂粒对其密封,并应检测焊件在炉体的中心位置,对暴露在炉体外的焊件部分应用保温材料包裹好,减少散热。为了更加准确地测量温度,在端头侧部和炉顶应分别放置热电偶测温。

(4) 钎焊工艺

① 确定钎焊温度的主要依据是所选用钎料的熔点,根据银基钎料液相线温度(627~635℃),选取钎焊温度 660~700℃为宜。

② 钎焊时钎料最好在钎剂完全熔化 3~10s 后即开始熔化,这时钎剂的活化能力最高。采用热炉加热(预热 350~400℃),可缩短钎剂和钎料熔化的时间间隔。

③ 由于钎焊件尺寸较长,铜管板、铜管束母材散热比较快,在焊件下端加一个小电炉,

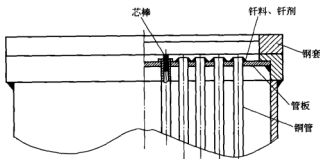


图 8.26 钎料钎剂放置位置示意图

以减少焊件散热。选择分段保温,加热到 550°C 时,保温 10 min,以使焊件加热均匀;在加热到 $660\sim 700^{\circ}\text{C}$ 时,保温 20 min,以保证钎料能充分填满间隙。若保温时间过短,则不能形成完整的钎缝,而时间过长又会产生熔蚀等缺陷。

④ 冷却速度对钎缝结构有很大影响。冷却过慢,会出现母材晶粒长大或析出强化相,但有利于细化钎缝组织并减小枝晶偏析;冷却速度太大,则可使焊件因形成过大的内应力而产生裂纹,或因钎缝迅速凝固,气体来不及逸出而形成气孔。根据焊件结构、母材和钎料特性等因素,选择缓慢冷却到 $400\sim 500^{\circ}\text{C}$ 后出炉空冷。

(5) 焊后处理

钎焊后必须清除焊渣,因为钎剂在有湿气时会产生腐蚀性。硼砂钎剂具有吸水和腐蚀的特性,采用在流动的水中使用钢丝刷刷去钎剂的效果良好。也可放在沸水中煮几分钟,然后用冷却水快速冲洗清理。

(6) 钎焊注意事项

① 铜管板的冷塑性变形,会导致钎缝装配间隙改变而影响钎焊质量,故钎焊前应将铜管板进行再结晶退火处理,以保证钎焊质量。

② 管束在钎焊前需用清洗剂或质量分数为 5% 的 H_2SO_4 溶液清洗,以清除接头表面的氧化物及油脂,减少钎焊中产生的气孔和虚焊等缺陷。

③ 钎焊前应对钎缝的装配精度进行严格的检查,以确保 $0.05\sim 0.10\text{mm}$ 之间的合理间隙。个别不合格的间隙,可采用胀管的方法达到配合要求。

④ 由于钎料中含有一些加热时容易挥发的有毒物质 (Cd 、 Zn 、 Pb 等),钎剂中也含有氯化物、硼化物等,所以在钎焊过程中应采取妥善的防护措施,以防污染环境,损害人身健康。

采用埋丝钎焊工艺钎焊的热交换器,安装在大型汽车上,在 1MPa 的压力下,经过一星期的振动试验,钎焊接头的力学性能完全满足各项指标要求。

8.3.3 转向油罐的火焰钎焊

汽车转向油罐是汽车油路系统中的重要零部件,由罐体、进油管、出油管及罐体支架组成,其结构见图 8.27。油管及罐体材质均为低碳钢,壁厚 1.5mm 。

油管与罐体、支架与罐体均采用焊接连接。根据汽车运行条件和气候特征,油罐在振动和具有一定油压的条件下工作。油罐工作温度为 $-40\sim 100^{\circ}\text{C}$ 。因此,对油管与罐体的连接提出了相应的性能要求。转向油罐组件虽然能用电弧焊焊接,但操作困难,效率较低,废品率高,油罐气密性难以达到设计要求。

根据油罐的结构特点及其对性能的要求,采用氧-乙炔火焰钎焊方法较为经济。该方法

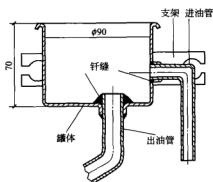


图 8.27 汽车转向油罐结构简图

加热迅速，母材晶粒长大不明显，工艺过程简单，又能保证必要的钎焊质量。钎焊时配合夹具，能够实现半自动化钎焊生产。

(1) 钎料的选择

钎料选用铜锌钎料（H62），其熔点为 $900 \sim 905^{\circ}\text{C}$ ，抗拉强度 $\sigma_b = 313.8\text{MPa}$ ，伸长率 $\delta \geq 20\%$ ，其组织为 α 固溶体，具有良好的强度和塑性。用 H62 钎料钎焊低碳钢，钎焊接头的抗拉强度可达 421MPa ，抗剪强度可达 294MPa ，接头具有良好的强度和塑性。由于火焰加热迅速，钎焊温度低，可有效降低锌的蒸发和减缓母材的晶粒长大。钎剂使用糊状钎剂，由硼酸、无水硼砂、氟化

钙及有机膏状物按一定比例调和而成。糊状钎剂使用方便，适用的钎焊温度范围为 $800 \sim 1150^{\circ}\text{C}$ ，适合于铜基钎料钎焊低碳钢、合金钢、不锈钢等。

(2) 钎焊工艺

① 钎焊接头的搭接长度 L_l 根据公式(8.1) 确定。

$$L_l = nF\sigma_b / (2\pi R\tau_f) \quad (8.1)$$

式中， n 为安全系数（一般取 $4 \sim 5$ ）； F 为油管的横截面积， mm^2 ； σ_b 为钎焊接头的抗拉强度， MPa ； R 为油管外径， mm ； τ_f 为钎焊接头的抗剪强度， MPa 。接头搭接长度还应考虑罐体油口冲压工艺的影响。通常，罐体油口冲压翻边高度为油口直径的 $30\% \sim 40\%$ 时较为合理。

② 选择钎焊间隙时，既要考虑母材与填缝钎料的相互扩散过程及母材对钎缝合金层受力时塑性流动的机械拘束作用，又要考虑钎料的填缝过程及钎剂残渣的排除问题。推荐钎焊间隙取值为 $0.05 \sim 0.2\text{mm}$ 。

③ 钎焊前油罐及油管表面采用苛性钠水溶液浸洗除油，再用硫酸和盐酸混合溶液清洗，清除表面氧化物，清洗后用冷水洗净，再用热风吹干待用。

④ 钎焊时，因工件壁较薄，钎料按图 8.28 所示放置，简便可靠且由于重力作用利于填缝。先对出油管进行加热钎焊，出油管钎焊加热结束后，转动夹具将油罐变位到图 8.28(b) 所示位置，放置钎剂和钎料进行进油管的钎焊。

(3) 焊后处理

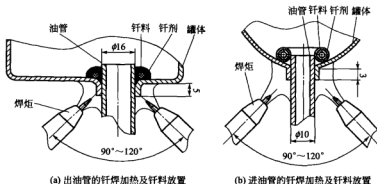


图 8.28 罐体与油管钎焊加热部位及钎料放置

钎剂残渣清理不净,会影响油罐镀铜效果,若使用时振动脱落混入油路,会影响油路系统正常工作,同时钎剂残渣还具有腐蚀性,因此焊后应严格清理。通常钎剂残渣的清理比较困难,可考虑采用热冲击和机械清理的方法清除钎剂残渣。其过程如下。

① 钎焊结束后,将工件立即投入沸水中,由于母材与钎剂残渣的线胀系数不同,渣壳发生炸裂和剥离而得以清除,此法即为热冲击法,同时沸水对残渣的微溶作用亦可清除少量残渣。此法效果良好,可大大减少机械清理的工作量。因为母材为低碳钢,对接头质量影响较小。

② 人工机械方法清除剩余残渣,使之符合镀铜工艺要求。

按产品设计要求,钎焊后对接头进行抽样破坏性力学性能检验及对油罐进行 0.2MPa 的气密性检验。

8.3.4 发动机基准轴的感应钎焊

基准轴是发动机上的一个重要零件,因其工作时高速旋转,故对零件的尺寸精度及配合公差要求非常严格。基准轴由前段、中段和后段以及支撑环等几个部分连接而成,前段、中段的材料为 1Cr18Ni9Ti,支撑环材料为 1Cr17Ni2,后段材料为 40Cr。基准轴结构如图 8.29 所示,连接处为薄壁,要求变形小,宜选用高频感应加热钎焊。

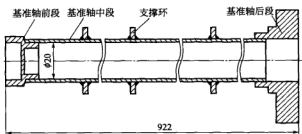


图 8.29 基准轴结构示意图

(1) 钎料选择

银基钎料广泛应用于结构钢、不锈钢、高温合金等材料的钎焊,所以采用 BAg50CuZnCd 钎料,改善材料的润湿性。

由于不锈钢添加元素多,表面氧化膜复杂,其中的氧化铬较稳定,氧化钛更稳定,难以去除,需采用活性强的钎剂。可以选用活性较强的 QJ102,焊前用纯净水调节并加热到沸腾冷却,冷却后的钎剂呈浆糊状,搅拌时见液体流动方可。

因为三种材料的线胀系数和热导率相差不大,因此各部件组合的间隙基本一致,取 0.03~0.06mm。

(2) 焊前处理

用砂纸沿钎缝方向打磨零件待钎焊处,用丙酮擦洗后,将调好的焊剂在部件的配合面处均匀地涂刷,然后将零件缓慢地转动数圈以保证钎剂在钎缝内基本均匀。

(3) 支撑环的钎焊

将零件用夹具定位,首先钎焊支撑环。将焊丝环套入钎焊位置,再均匀涂上钎剂,保证焊丝环被包裹在钎剂中,加热进行钎焊。

(4) 前段的钎焊

感应器装配时要求水平放置并与零件同心,在待焊处均匀涂上钎剂,预置一个焊丝环,加热时感应器预先放置在焊丝环的下方,待焊丝环达到熔融状态,立即按动按钮使焊丝环移

至感应器下方，加热停止后等钎料凝固后取下零件。

(5) 后段与中段的钎焊

由于零件在钎焊过程中会发生收缩，而零件中段壁较薄，因此在钎焊时留 0.2mm 的收缩量，保证焊后总长达到设计要求。因为后段和中段的配合面较长，在配合处预置了两个 $\phi 1.0\text{mm}$ 的焊丝环，加热时感应器在焊丝环以上 8mm 处，加热 8s 待中段见红后立即按动按钮使夹具上升，焊丝环移至感应器上方进行钎焊，加热停止等钎料凝固后取下零件。

焊后用清水清洗钎缝处，然后进行酸洗、校直，保证同轴度和直线度要求。

8.4 在电子工业中的应用

8.4.1 波导器件的钎焊

波导器件是一种结构复杂、精度要求高的雷达微波组件，是雷达移相器、扫频天线等的“心脏”，广泛应用于雷达反馈、接收和发射系统。

(1) 炉中钎焊

蛇形波导是一种由上百个零件构成的巨型特殊铜波导，结构十分复杂，钎缝既多又长，达 50 多米，构件重达 500kg。为加工、运输方便，将其分成 9 段，用法兰相连，每段长度约为 1.2m，重约 50kg，如图 8.30 所示。主要技术要求如下。

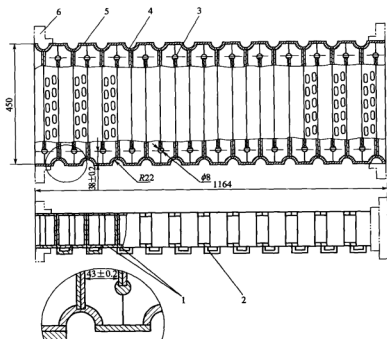


图 8.30 蛇形波导分段结构示意图

1—波导管；2—法兰条；3—圆柱；4—半圆管；5—重板；6—法兰盘

- ① 内腔表面粗糙度低于 $Ra0.8\mu\text{m}$ 。
- ② 分段蛇形波导的直线度 $\leq 100:0.01$ 。
- ③ 波导口径与其他零件的尺寸公差为 $\pm 0.2\text{mm}$ 。

④ 钎缝必须 100% 钎焊透, 不允许存在虚焊、漏焊、未焊透和夹渣等缺陷。

蛇形波导的基体金属为无氧铜和含少量锌的 H96 黄铜。所用钎料为 BAg72Cu 共晶钎料, 熔化温度为 779℃, 钎焊温度为 810~820℃。蛇形波导在 H-75 型箱式电阻炉(炉门经适当改造)中进行氢气保护钎焊。上百个零件组装后的装配间隙之和以不大于 0.05mm 为佳。选用模夹具必须考虑工件和模夹具在钎焊温度下热膨胀系数对装配间隙的影响。由于氢气与空气混合后, 氢气的体积分数为 3.3%~81.5% 时, 就会发生爆炸, 因此钎焊过程必须严格遵守氢气炉安全技术操作规程。钎焊加热前, 炉内应先抽真空, 随即充氮, 反复数次。确信炉中空气已被氮气置换后充氢气, 并使氢气通过水封器排出室外, 启动 H-75 电阻炉, 并用试管采样检验氢气纯度。当工件均匀升温至 820℃ 后, 立即停止加热, 同时应适当增加氢气的流量。工件降温至 200℃ 后, 通氮气入箱置换氢气, 同时切断氢气, 在确信箱内氢气绝大部分已被氮气置换后, 即可取出工件。

(2) 真空钎焊

典型的铝波导零件钎焊结构如图 8.31 所示, 零件的材质为防锈铝合金 3A21 (LF21)。

① 钎焊前的准备

a. 零件清洗。将零件放入温度为 80℃、30% 的 H_2SO_4 溶液中浸洗, 冷水洗涤后再放入 30% 的 HNO_3 溶液中浸洗, 最后经热水洗涤后, 采用热风干燥。

b. 零件装配。将厚度为 0.1mm 的箔状钎料夹持在接头的间隙内, 把丝状钎料放置在法兰盘上紧贴着波导管。法兰盘与波导管的钎焊间隙为 0.1~1.5mm。所用钎料为含金属活性剂 Mg 的钎料 HLAlSiMg10~15 (熔点为 555~585℃)。

② 钎焊工艺过程

a. 钎焊设备为冷壁真空炉, 极限真空度为 6.67×10^{-3} Pa。

b. 钎焊时, 将装配好的焊件和少量镁块放入钎焊炉中。

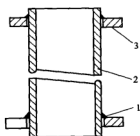


图 8.31 铝波导零件的钎焊结构

1—钎料；2—波导管；3—法兰盘

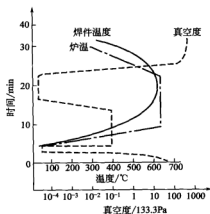


图 8.32 铝波导零件真空钎焊的工艺参数

c. 真空度抽至 6.67×10^{-3} Pa 后, 调节真空炉的针阀, 通入 13.33Pa 压力的流动氩气, 并开始加热。

d. 当加热温度到达 550℃ 时, 关闭氩气, 并把真空炉内的压力调节到 1.33×10^{-2} Pa。

e. 焊件到达钎焊温度 610~615℃ 后, 保温 5min, 然后停止加热, 并通入氩气, 加快焊件的冷却。

f. 炉温冷却至 100℃ 以下时, 打开炉门, 取出焊件。

g. 铝波导零件真空钎焊的工艺参数如图 8.32 所示。在升温过程中通入低压力的氩气可以防止 Mg 金属的过早蒸发。接近钎焊温度后, 抽成高真空可以最有效地发挥 Mg 蒸气的作用。

8.4.2 铜/铝合金 CPU 散热器的钎焊

由于计算机中 CPU 运算速度的加快, CPU 的稳定性对散热条件提出了严格的要求, 开发散热效果好的散热器, 是提高 CPU 运算速度的有力保障。在原有铝合金散热器的散热翅片反面加厚度 5~6mm 的紫铜板, 可获得更好的散热效果。但由于铝与铜的热物理性质差异很大, 形成致密可靠的连接难度较大, 因此如何将两者 (铝与铜) 有效地连接在一起成为铜/铝合金 CPU 散热器能否应用的关键。

CPU 散热器由铝合金散热器与铜板钎焊而成, 其中铝合金散热器的尺寸为 70mm×50mm×30mm, 铜板的尺寸为 70mm×50mm×5mm, 如图 8.33 所示。

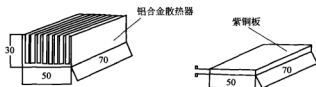


图 8.33 铜/铝合金 CPU 散热器示意图

(1) 钎焊膏的制备

针对铜与铝合金 CPU 散热器的钎焊特点, 钎焊膏主要由适当比例的活性粉末 (颗粒度为 50~100μm 的球形粉末状, 含氧量小于 0.03%)、改良过的无腐型钎剂及有机粘接剂组成, 其中活性粉末能与铝和铜在一定温度下发生反应, 在铝和铜之间形成一种导热良好的合金反应层; 改良过的钎剂主要成分为 $KAlF_4$ 、 $K_2AlF_5 \cdot H_2O$ 、 K_3AlF_6 以及降低熔点的微量元素。这种钎剂在达到一定的加热温度时能去除铝合金和铜表面的氧化物及污染物, 以保证反应的顺利进行; 粘接剂采用有机纤维素配制, 是在高温挥发后不留残渣的有机化合物, 具有适度的黏性, 作为活性粉末和钎剂的载体, 能长期保存, 不会与任何一种成分发生化学反应。

粘接剂的配置工艺如下: 采用离子交换净水器对蒸馏水进行净化, 水质达到一级水的标准, 按 0.5% 的比例进行配比搅拌, 静置 24 h 以上使用。活性粉末、无腐型钎剂及有机粘接剂按照适当的比例在搅拌器中搅拌均匀。得到的钎焊膏密度为 2.8g/cm³, 无色无味、无腐蚀, 不燃烧、不爆炸, 不与其他物质发生化学反应。

(2) 焊前准备

在常温及高温下, 铝合金和铜表面都存在阻碍反应进行的污物及氧化膜, 钎焊前须仔细去除工件待焊面的污染物及氧化膜。焊前处理过程为: 铜板采用机械去油和氧化膜的方法 (即用 400 号砂纸打磨铜板的待焊表面), 然后用清水清洗, 晾干; 铝合金采用 10% 的烧碱溶液去氧化膜, 然后用清水清洗, 再用 5% 的硝酸溶液中和处理, 然后用清水清洗后晾干。钎焊时钎焊膏刷涂在铝合金一侧。

(3) 气体保护炉中钎焊工艺

气体保护炉采用氩气保护, 焊接设备如图 8.34 所示。钎焊时采用冷却水保证炉膛口的低温状态, 避免炉膛盖的橡胶密封圈受热而降低密封作用。为保证氩气的流动性和炉膛内的

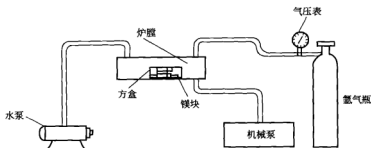


图 8.34 焊接设备示意图

气压，在设计出气孔的同时，将氩气流量控制在 $2\sim 3\text{L/min}$ 。为提高反应气氛的质量，将试件放置在一个 $200\text{mm}\times 150\text{mm}\times 70\text{mm}$ 方形盒中，在盒中试件周围放置 $8\sim 10$ 小块 Mg，利用 Mg 在高温下的蒸气净化气氛，以降低氧分压。

钎焊工艺流程为：化学清洗→配料→装配试件、加压→进炉→抽真空、充氩气→设定温度、升温→保温→降温冷却→工件出炉。

为保证散热器的尺寸，采用的夹具必须保证试件在钎焊过程中被可靠地压紧，以增加试件之间的接触面积，避免发生变形。夹具自身不能和试件发生接触反应，且与试件的溶解度很小，要求夹具刚性好、变形量小、成本低、易于加工。因此采用了“弹性夹具”：试件由不锈钢限制板压紧，压板间设置高温弹簧，弹簧可根据钎焊所需的压力大小采用不同的型号，使弹簧垫圈的压紧力在钎焊温度时不会使焊件变形，而在降温时又始终能压紧试件。焊后钎焊接头的平均拉伸强度在 100MPa 以上，可以满足计算机芯片散热器的使用强度要求。

(4) CPU 散热器的高频感应钎焊

高频感应钎焊具有加热速度快、温度易控制、工作环境好、容易实现自动化焊接和控制等特点，应用于铜与铝合金 CPU 散热器器件的钎焊批量生产，可以降低生产成本，提高生产效率。

钎焊时将涂敷好焊膏的工件置于感应器上，感应器为平面形式，其与工件之间有一带磁性的感应板，热量通过感应板被感应加热，然后在压力的作用下传递到工件上。通过调整电源的输出功率、加热时间及加热后停留的时间来完成钎焊过程。散热器钎焊采用的电源输出功率为 10kW ，加热时间 28s ，加热后停留时间 32s ，可获得接头结合致密、性能良好的钎焊工件。

8.4.3 K_a 波段微带天线的炉中钎焊

K_a 波段（频率在 $12\sim 18\text{GHz}$ 的无线电波波段）微带天线具有结构简单、重量轻、易于加工制造的特点，是常见的天线形式之一。微带天线装配过程中，通常采用的方法是导电胶（膜）胶接后加热固化，这种工艺的主要缺点是返修较为困难，二次加工导电胶（膜）不易清理干净，而采用低温钎料（ Sn63Pb ）可方便返修并提高其长期可靠性。

微带天线的结构如图 8.35 所示，主要由微带板和接地板两层组成。图中方块状为天线的有效辐射单元，与各辐射单元对应位置的接地板上均加工出方槽，最终微带板与接地板通过一定的方式连接在一起，这样就形成了一个封闭腔体。接地板采用 5A06 铝合金材料，为保证精度，采用数控铣加工。

微带天线的连接采用氮气保护炉中钎焊工艺，钎焊之前可采用超声波清洗焊件。微带板

和接地板分别加热到 200°C ，将焊片置于待焊表面熔化完成搪锡，要求搪锡后表面平整。一般情况下，选择钎焊温度高于钎料熔点 20°C 左右。

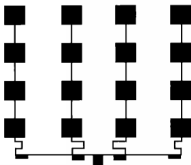


图 8.35 微带天线结构示意图

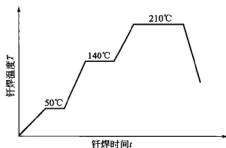


图 8.36 钎焊工艺曲线设计

由于采用氮气保护炉中钎焊，工件受热较真空钎焊快。但由于微带板热导率低、传热慢，设计了分段加热并保温措施（图见 8.36）。最终保温时间决定钎焊质量的好坏，保温时间短，则钎料铺展不充分，保温时间过长，钎料容易沿侧壁流入腔内。

采用 X 射线检验方法对钎焊好的微带天线进行检查，显示天线腔内无进锡现象，加工出的微带天线满足电信设计要求。

8.4.4 测井陶瓷探头的真空扩散钎焊

某多功能测井陶瓷探头主要由 45 钢制探头体、 Al_2O_3 陶瓷电极座和铜电极等组成，见

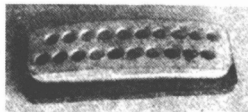


图 8.37 测井陶瓷探头实物图

图 8.37。采用钎焊将陶瓷电极座和铜电极固定到 45 钢探头体上。用常规方法钎焊连接的 45 钢探头体与 Al_2O_3 陶瓷电极座的钎缝致密性差，强度低，且因钎料的流失导致陶瓷电极座的绝缘性能下降，无法满足测井工程要求。

为避免上述难题，可以采用真空扩散钎焊方法，全部试样和测井陶瓷探头组件在真空度为 $7 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 条件下进行钎焊。为改善陶瓷电极座与 45 钢基体真空扩散连接的焊接性，避免因两种材料的线胀系数相差较大引起的热应力造成陶瓷电极座开裂，采用涂有活性钬、银粉的紫铜板（厚 0.5mm ）作为中间工艺夹层材料，可以得到良好的钎焊接头。

8.5 在家电工业中的应用

8.5.1 电磁换向阀的感应钎焊

图 8.38 为电磁换向阀的结构示意图。电磁换向阀主要由主阀体（H62 黄铜）、针阀杆（塑料）、端盖（H62 黄铜）和毛细管（纯铜）等组成。由于在高频感应钎焊电磁阀两端盖及毛细管之前，主阀阀芯及滑阀、密封件及针阀杆均已装配好，若钎焊不好，整个换向阀就要报废。滑阀的密封圈和针阀杆均是塑料制品，其承受的最高温度不得超过 250°C 。主阀阀体与其他组件配合要求很严，若焊后主阀变形较大，则会产生内部泄漏现象。由于毛细管与

阀体热容量相差较大,若工艺上不采取措施,则容易导致毛细管由于过热而熔化。

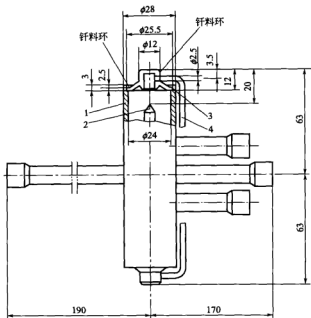


图 8.38 电磁换向阀的结构简图

1—主阀体 (H62)；2—针阀杆 (塑料)；3—端盖 (H62)；4—毛细管 (纯铜)

选择 60kW、300kHz 的高频感应加热电源,采用 2 匝感应线圈,感应线圈与焊件之间的间隙为 5mm。为了防止毛细管局部过热熔化,设计一个磁场凝集器。钎焊选用银钎料 HL303,端盖用的钎料预制环外径为 $\phi 25.5\text{mm}$,钎料丝直径为 $\phi 1.2\text{mm}$ 。毛细管用的钎料预制环内径为 $\phi 25.5\text{mm}$,焊丝直径为 $\phi 0.25\text{mm}$,每处接头共放 5 圈。钎剂选用 QJ102,并加水将其调制成药状。实际加热功率为 20kW,钎焊时间 10s。焊件焊后随即在水中冷却。待焊件冷却后,按上述工艺钎焊另一个端头。等两个端头都钎焊好后就进行气密检查及换向阀性能测试。

8.5.2 冰箱压缩机的火焰钎焊

压缩机的外壳是由上、下壳体组成。壳体上的排气管、工艺管与吸气管 (三管) 根据压缩机的结构不同而分布在不同位置。三管的材质为 TP1 铜管和邦迪管 (镀铜钢管),壳体为 ST14 低碳钢。

压缩机管与壳体的接头形式为插接,如图 8.39 所示。所得钎缝外观要求光滑,无裂纹、缩孔和未焊透,即壳体内外表面沿管子周围能看到均匀的钎缝。壳体与三管的连接,过去都为手工火焰钎焊,现在大多采用自动火焰钎焊。

目前常用 12 工位转盘式专用钎焊机进行压缩机的钎焊,该机采用 6 套加热机构同时对三根管子进行预热和钎焊加热。6 套加热机构安装在转盘外围固定不动的台面上。为保证加热均匀,加热机构上装有两把射吸式焊炬和

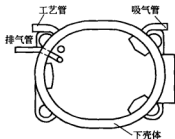


图 8.39 压缩机外壳示意图

摆动机构。焊炬的位置即加热点以及加热火焰的状态均可任意调节。 $\phi 1.2 \sim 1.4\text{mm}$ 的盘状钎料丝采用气动送进方式。铜管用钎料为 BR-38, 其成分 (质量分数) 为 38% Ag、19% Cu、16% Zn、27% Cd, 熔化温度为 $625 \sim 650^\circ\text{C}$; 邦迪管用钎料成分 (质量分数) 为 35% Ag、35% Cu、30% Zn, 熔化温度为 $675 \sim 750^\circ\text{C}$ 。由于镉有毒, 有些企业采用不含镉的钎料, 如 Ag34CuZnSn (液相线温度为 730°C) 和 Cu91AgP 钎料 (熔化温度为 $643 \sim 788^\circ\text{C}$)。钎剂为空调、电冰箱压缩机专用钎剂, 熔点为 $550 \sim 790^\circ\text{C}$, 有些厂家使用 QJ102 钎剂或主要由硼酸三甲酯 (硼砂、硼酸) 等组成的钎剂。燃气采用丙烷或液化石油气。火焰调成略偏氧化的中性焰, 并用外焰加热, 以防止压缩机壳体、铜管及钎料的氧化。

该自动钎焊机除需人工装卸焊件、插管和涂钎剂外, 其余过程均为自动进行。使用上述材料和参数, 已钎焊了几十万个产品, 所焊三管的钎缝质量达到了产品技术要求, 一次合格率在 98% 以上。

此外冰箱压缩机内部的高压排气管采用了自动感应钎焊。冰箱、冷柜生产中, 总装线上各管口的连接都以手工火焰钎焊为主。制冷回路材料采用脱氧铜管、邦迪管, 钢件的钎焊采用铜钎料, 钢件与铜管钎焊采用含 Ag 40% (质量分数) 的银钎料, 铜管与铜管钎焊用铜磷钎料。

8.5.3 空调器四通阀的钎焊

空调器四通阀如图 8.40(a) 所示, 是空调器的冷、暖换向阀, 是关键部件, 需三台专用钎焊设备进行钎焊。

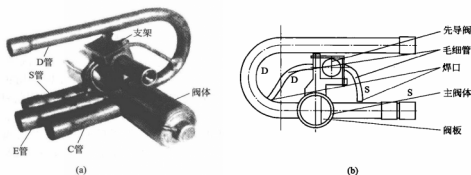


图 8.40 空调器四通阀

采用六工位转盘式自动火焰钎焊专机对四通换向阀的 S、E、C、D 接管及支架滑块与阀体进行钎焊。每个工位配 1 套夹具, 钎焊不同型号的四通换向阀要求用不同夹具。一工位: 装卸焊件; 二工位: 对焊件进行预热; 三工位: 摆动预热焊件; 四工位: 摆动式加热并送丝, 钎焊 S、E、C 管及支架; 五工位: 送丝、钎焊 D 管; 六工位: 先压缩空气空冷, 然后水冷。加热燃气为液化石油气, 压力为 0.1MPa, 耗量为 $2.5\text{m}^3/\text{h}$; 氧气压力为 0.5MPa, 耗量为 $5\text{m}^3/\text{h}$; 压缩空气压力为 0.6MPa。

QH-A 自动火焰钎焊专机用来对空调四通阀先导阀上毛细管 D、S 分别与主阀上的 D、S 接管进行钎焊, 如图 8.40(b) 所示。毛细管为 $\phi 3\text{mm} \times 0.75\text{mm}$ 纯铜管, 主阀的 D、S 管为 $\phi 10\text{mm} \times 1\text{mm}$ 和 $\phi 13\text{mm} \times 1\text{mm}$ 纯铜管。此自动火焰钎焊专机使用丙烷气作燃气, 燃气和氧气采用流量计精确控制配比。焊炬由两组交叉焊嘴组成加热源, 利用调整交叉点来加热钎焊处。送丝机构送出的钎料可以在 6 个自由度任意调整位置和角度, 以满足多种规格的零件的钎焊要求。钎料为铜磷钎料 (如 BCu93P), 钎焊温度为 $810 \sim 900^\circ\text{C}$ 。阀体在钎焊过程

中内部通氮气保护。钎焊工艺参数的设定、故障的显示、程序控制均采用 PLC (可编程逻辑控制器), 以触摸屏为主控元件, 操作简便。

8.5.4 电热管的钎焊

电热管基体材料为纯铜, 结构示意图如图 8.41 所示, A、C 处为管板钎焊接头, 钎缝要求光滑、致密、不渗漏, 同时 C 处还要承受一定的扭力。B 处为管钎焊在板上, 钎缝除应光滑致密外, 还要求钎料尽可能不流散。

考虑到要大批量生产, 设计一台 12 工位的自动火焰钎焊机, 采用圆盘转动式工作台、人工装卸零件。工艺流程为: 装零件—预热 1—预热 2—钎焊—水冷—卸零件。采用棘轮间歇机构来控制转盘的转动及停留。由于基材为纯铜, A、C 处采用的钎料环为 BCu93P, B 处采用相同牌号的进口焊膏, 钎剂为气体钎剂。以氧与石油液化气的混合气体作为加热热源。单台机采用 12 支焊枪, 每个工位 (预热及钎焊) 共 6 支枪、前后各 3 支。单台机班产不少于 2500 个电热管, 钎焊质量稳定可靠, 钎缝成形美观, 一次钎焊成品率可达 99.5% 以上。目前电热管的规格品种很多, 它与温控器配合已广泛应用于咖啡壶、热水器和电饭锅等家电产品。

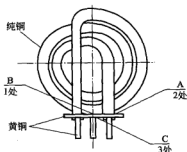


图 8.41 电热管示意图

8.5.5 空调冷凝器和蒸发器的钎焊

空调室外机中的冷凝器和蒸发器, 它们的构成相似, 都是由 U 形管、弯头和翅片组成。通过叠片、穿管、胀管等工序加工成半成品, 再将弯头按照设计的接管方式, 采用自动火焰钎焊将 U 形管连接成一个或多个密封回路。

冷凝器和蒸发器管路系统都采用 TP2 铜管, U 形管与弯头之间连接采用自动火焰钎焊。弯头与 U 形管的单面装配间隙为 0.05~0.15mm, 插管深度为 8mm。使用具有自钎性的铜磷钎料 (BCu93P), 不使用膏状钎剂, 而使用气体钎剂, 它是硼酸三甲酯与甲醇、丙酮的混合物, 以提高铜管焊后的外表质量。钎料为 $\phi 1.6\text{mm}$ 的丝材和 $\phi 9.5\text{mm}$ 的环。钎焊接头在 140~200℃ 的隧道烘干炉中停留 3~5min。采用丙烷和氧气加热。加热焊炬数量为 12 把, 三套加热规范。焊炬离焊件距离为 60mm, 钎焊温度为 730~830℃, 流水线速度为 30mm/s, 生产效率达 180 台/h。

此法钎焊成品接头不合格率为万分之一。主要钎焊缺陷是气孔, 其影响因素很多, 其中间隙不均, 对 U 形管、弯头的清洗不彻底, 火焰位置设置不当等最为关键。

8.6 在机械加工刀具中的应用

8.6.1 硬质合金刀具的火焰钎焊

硬质合金刀片由 WC、TiC、Co 等粉末压制、烧结而成, 刀杆常选用综合性能较好的 40、45 等中碳钢制作, 通过钎焊将刀片和刀杆连接在一起。刀槽形状如图 8.42 所示, 刀体和刀头厚度比为 3:1, 刃头宽度小于刀体的 2/3, 刀槽内棱角处应有圆弧过渡, 以避免刀体产生裂纹。刀槽用铣床或刨床加工, 要求加工面粗糙度不低于 $Ra 6.3\mu\text{m}$ 。

硬质合金刀片与刀杆的钎焊常采用高频感应钎焊、火焰钎焊。火焰钎焊设备简单, 燃气来源广, 连接成本低, 灵活性大, 适用于中小型机加工企业。

(1) 焊前清理

刀片在焊前采用喷砂处理,也可在碳化硅砂轮上用手工轻轻磨去钎焊面的表层,清除表面过多的碳,以提高钎焊时的润湿性。清理刀片时要注意不可用机械的方法夹住刀片在砂轮机或磨床上磨削,以免产生裂纹,更不能采用化学机械研磨的方法,否则会将刀片表面的钻腐蚀掉,导致钎焊时难以润湿刀片,造成钎焊接头强度下降,甚至使用时刀头脱落。

刀槽在钎焊前用锉刀将毛刺去除,并进行喷砂处理,然后用汽油或丙酮将粉尘清洗干净。

(2) 钎料选择

硬质合金钎焊最常用的是铜锌钎料,在钎料中添加锰、镍、铁等合金元素可提高钎料的润湿性和接头的强度,钎剂可选用粉 301 (硼砂 30%、硼酸 70%)。

(3) 火焰钎焊工艺

选用 H01-12 型焊炬,配用 5 号焊嘴。氧气压力为 0.7MPa,乙炔压力为 0.001~0.1MPa,钎焊温度为 950~1050℃。

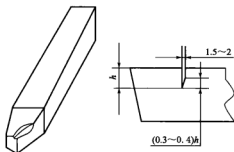


图 8.42 刀槽形状

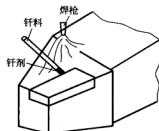


图 8.43 硬质合金刀片钎焊示意图

① 钎焊时,为防止 YT15 合金刀片脱碳或过烧,要选用碳化焰。

② 钎焊时应采用外焰加热,不允许用焰心,使用外焰加热时温度较低,火焰体积大,加热范围大,有利于加热均匀及钎料填充间隙。

③ 钎焊时焊嘴与刀杆的距离为 50mm,焊嘴与刀杆倾斜角度为 110° ,可保证有效地利用火焰热量和加热平衡,如图 8.43 所示。

④ 钎焊时,焊炬由左向右、由右向左、由上向下反复对刀体(刀槽的四周)进行加热,使刀体和刀片受热均匀一致。

⑤ 当刀体呈暗红色(500~650℃)时,应立即填加钎剂,并继续加热,使钎剂充满整个钎缝。

⑥ 当刀体呈红色(1000℃)时立即将蘸有钎剂的钎料送入接头缝隙处,利用刀槽和刀片的热量,使其快速熔化,并渗入和填满钎缝间隙。

⑦ 钎焊过程应在 1min 内完成,防止 YT15 刀片过烧或脱碳。

(4) 焊后处理

① 钎焊后应立即将车刀放入草木灰或石棉灰中缓冷,或者直接放入 370~420℃的炉中进行低温回火,经保温 2~3h 后随炉冷却,以减少内应力,防止裂纹产生。

② 钎剂的残渣对接头起腐蚀作用,也妨碍对钎缝的检查,应清除干净,用刮刀等将多余的钎料、钎剂及杂质刮掉,使钎缝表面光滑、整洁。

8.6.2 金刚石薄壁钻的感应钎焊

金刚石薄壁钻广泛应用于混凝土、水泥、石材、沥青马路、玻璃、硬质砖石等非金属硬脆材料的钻孔及取样,以及建筑施工、房屋改造及管道铺设和市政建设等施工中,是工程建设不可缺少的消耗工具之一。薄壁钻具有钻进快、免修刃、寿命长的优点。

图8.44为金刚石薄壁钻示意图。金刚石薄壁钻的工作条件较为恶劣,在进行钻切工作时,钻头内外侧同时受剪切力和强冲击力,并且要承受瞬时的高温,因此对金刚石薄壁钻接头强度的要求很高。

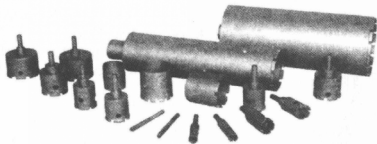


图 8.44 金刚石薄壁钻示意图

(1) 钎料的选择原则

① 由于金刚石的耐热温度有限,因此钎料的熔化温度不要超过 800°C , 以 $600\sim 750^{\circ}\text{C}$ 为宜。

② 钎料对钻头和钢基体要有良好的润湿性。

③ 钎料要有良好的抗疲劳性和强的抗高温蠕变能力,能承受瞬时的高温 ($200\sim 400^{\circ}\text{C}$)。

④ 宜采用感应钎焊和火焰钎焊、电阻钎焊等工艺。

选用钎料时,首先要满足上述条件,同时要针对被焊薄壁钻工作时承受载荷的性质、工作温度以及其他要求选择相应的钎料进行钎焊。

(2) 钎焊工艺

常用的金刚石薄壁钻的钎焊方法有:盐浴钎焊、火焰钎焊、电阻钎焊和高频感应钎焊等。其中高频感应钎焊是金刚石薄壁钻最常用的连接方法。

① 钎焊过程中,钎焊温度、保温时间和加热速率不仅影响金刚石的氧化程度,也会影响润湿性和气孔率,从而影响到钎焊接头的力学性能。钎焊温度过低时,残留在钎料中的气体过多,很难排出,孔隙率较高;而且钎料对母材润湿不充分,填缝能力低,易产生夹渣、造成假焊,影响接头的抗剪强度。然而温度过高,就会引起钎料中低沸点组元的蒸发、母材晶粒的长大及母材与钎料相互作用过分而导致的熔蚀、脆性化合物生成和晶间渗入等;同时胎体结合剂中的 Co、Fe、Ni 组分在高温下能溶解大量的 C,对金刚石有明显的腐蚀、碳化、石墨化作用,从而降低薄壁钻的使用性能。

② 保温时间的长短也是影响钎焊接头力学性能的重要因素。保温时间较短时,利于保护金刚石,但钎料与母材不能充分润湿,会降低钎透率;保温时间过长,容易使钎料氧化、生成脆性相及引起晶间渗入等,还会造成金刚石表面碳化。

③ 加热速率对钎焊接头的质量也有一定的影响。加热速率快对金刚石是有利的,这一点已经被实践所证明,但会使焊件温度分布不均而产生内应力和变形。加热速度过慢又会促

进母材晶粒的长大、钎料中低沸点组元的蒸发以及钎剂的分解等不利后果的发生。因此,在保证均匀加热的前提下,应尽量缩短加热时间,提高加热速率。

④ 钎焊件的冷却虽在钎焊保温结束后进行,但冷却速度对钎焊接头的质量也有很大影响。冷却速度过慢,可能引起母材的晶粒长大,强化相、析出相或残余奥氏体出现;加快冷却速度,有利于细化钎缝组织并减小枝晶偏析,从而提高钎焊接头强度,但冷却速度过快,可能使钎焊件因形成过大的内应力而产生裂纹,也可能因钎缝迅速凝固使气体来不及逸出而形成气孔。

8.6.3 聚晶金刚石复合片切削齿钻头的钎焊

聚晶金刚石复合片切削齿(PDC)钻头与普通金刚石钻头及牙轮钻头相比,具有钻速快、寿命长、成本低等特点。图 8.45 为一聚晶金刚石复合片连接碳化钨斜面柱栓上组成的烟斗形切削齿柱。PDC 石油钻头上大约装有几个聚晶金刚石切削齿柱。

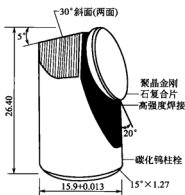


图 8.45 切削齿外形尺寸

(1) PDC 钎焊要求

聚晶金刚石复合片是人造金刚石细粒加黏结剂(如硅、硼、钛、镍、钴等)在高温高压下与硬质合金胎体聚合而成的。此复合片的聚晶金刚石部分与硬质合金(碳化钨)胎体部分具有不同的热胀系数、热导率、耐热性和石墨化倾向。因此若连接时输入的热量过高,就会导致聚晶金刚石与碳化钨胎体开裂和分层,同时也会降低金刚石的耐磨性以及抗冲压强度的能力。因此对钎焊工艺提出如下要求。

- ① 钎焊时金刚石复合片所承受的最高温度应低于 750℃。
- ② 复合片与碳化钨柱栓钎焊后的钎缝抗剪强度 τ_b 应大于 392MPa。
- ③ 所焊切削齿应能大批量生产,并在相应钻井生产的实际条件进行井下试验时,掉片率应不大于 5%。

(2) PDC 钻头钎焊工艺

钎焊 PDC 钻头的方法主要有火焰钎焊、感应钎焊、真空炉中钎焊和真空扩散钎焊等。

① 火焰钎焊和感应钎焊采用 BAg40CuZnCdNi (HL312) 银钎料,其熔化温度为 595~605℃,接头抗剪强度一般都低于 250MPa。

② 选用 YG15 硬质合金与厚度为 1.0mm 的聚晶金刚石进行真空炉中钎焊,钎料为 Ag-Cu-Ti 钎料箔,夹在两者中间,用夹具施加一定压力。钎焊参数:热态真空度不低于 5×10^{-2} Pa,钎焊温度为 $930^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$,保温时间为 $5\text{min} \pm 1\text{min}$ 。钎角完整均匀,抗剪强度 $\tau_b > 150\text{MPa}$ 。也可采用 40AgCuZnSnMn 钎料(熔化温度 659~670℃),进行复合片与硬质合金真空炉中钎焊,钎焊温度为 695℃,钎焊接头的抗剪强度可达到 220~259MPa。

③ PDC 钻头真空扩散钎焊采用厚度为 $10\mu\text{m}$ 的纯镍片作为中间层,扩散钎焊温度为 680℃,真空度为 5×10^{-2} Pa,焊接压力为 150MPa,保温时间为 3h。聚晶金刚石复合片与碳化钨的接头强度可达到 500~560MPa。装有该切削齿柱的 PDC 钻头在平均机械钻速为 4.78m/h 时,进尺达 936.3m,切削齿柱完全满足 PDC 钻头实际使用要求,且很适宜在高温或腐蚀介质中使用。图 8.46 为一装有真空扩散钎焊切削齿柱的 PDC 钻头。

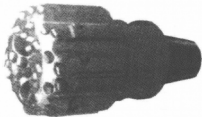


图 8.46 PDC 钻头



图 8.47 刀杆槽形设计

8.6.4 聚晶金刚石车刀的钎焊

聚晶金刚石车刀具有硬度高(为 10000HV、高速钢的最高硬度为 1037HV、硬质合金为 1400~1800HV)、较高的热导率、耐磨性好、抗黏结性强、抗氧化能力强、与有色金属间摩擦系数低等优点,又有韧性差、对铁亲和作用大的特点,多用于有色金属(无氧铜、超硬铝)、塑料、玻璃纤维等非铁族元素的精密车削。加工表面粗糙度在 $Ra\ 0.02\sim 0.1\mu\text{m}$ 之间,刀具耐用度可达 100~200h,其车削长度为高速钢的 250 多倍、硬质合金的 60 多倍。聚晶金刚石在刀头上的固定方法有三种形式,即机械夹固、粉末冶金法固定和钎焊固定。机械夹固需要较大颗粒的金刚石;粉末冶金法固定可使用较小颗粒的金刚石,对金刚石的使用较为经济,但小颗粒的金刚石切削磨损后容易脱落,影响刀具的使用寿命;采用钎焊固定聚晶金刚石连接较为可靠。

合理的刀杆槽形有利于聚晶金刚石块的固定,由于人工合成的聚晶块多为圆柱形,刀槽设计按图 8.47 所示形状为宜。槽窝与刀杆平面呈现 45° 角。焊后前刀面恰好水平,减少前刀面磨损。

(1) 钎料、钎剂的选择

根据人造聚晶金刚石的物理化学特性及使用情况,采用熔点为 $610\sim 630^\circ\text{C}$ 的低熔点银基钎料 BA9-1,钎焊温度不超过 700°C ,以防止钎焊温度过高而造成聚晶金刚石石墨化。这种钎料具有钎缝强度高、流动性和润湿性好等优点。配合 BA9-1 用钎剂成分主要包括脱水硼砂、硼酸和氟化钾。

(2) 焊前准备

检查人造聚晶金刚石有无缺陷,将检查后的人造聚晶金刚石用酒精、汽油或四氯化碳洗净后镀银,以利钎焊。检查刀槽与刀块的配合,刀槽与金刚石块配合间隙不大于 0.1mm ,槽孔与金刚石块高度差不大于 $\pm 0.2\text{mm}$ 。用汽油或酒精清洗刀槽。

(3) 钎焊工艺

① 将钎料(剪成小块)、钎剂、金刚石依次放入刀槽中,并在金刚石与刀的头部分撒上一层钎剂。

② 将上述车刀小心放入高频电炉、箱式电炉、焦炭炉中加热,或用氧-乙炔焰加热。

③ 加热至钎料熔化并沿金刚石和刀槽边缘上渗,使金刚石同时浮起,保持此温度,用压棒将金刚石块压下,并马上松开,如此 2~3 次以排除熔渣,然后停止加热,将金刚石块压住,直至钎料全部凝固为止。

④ 待刀具缓慢冷却后,将其在沸水中煮沸 40~60 min,使刀的头部分钎剂溶解于水。

⑤ 用细砂喷除焊件表面的氧化皮和多余钎剂。

⑥ 检查钎缝有无气孔、夹渣。

8.6.5 盾构掘进机用特种刀具的感应钎焊

在苛刻的服役工况条件下,盾构刀具断裂失效、磨损严重等情况时常发生。典型的盾构

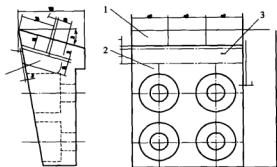


图 8.48 典型盾构用特种刀具结构

1—硬质合金刀片；2—钢基刀体；3—堆焊层

刀具结构参见图 8.48。钢基刀体与硬质合金刀片通过钎焊连接而成，整个特种刀具再与盾构掘进机的刀盘连接，在施工推进中起到切削作用。盾构刀具中钢基刀体与硬质合金刀片之间连接性能的优劣关系到施工中是否发生失效。然而钢件与硬质合金的热膨胀系数相差很大，为保证足够的施工强度要求而必须实施大面积钎焊，难度较大。

(1) 钎料的选择

① 钎料对硬质合金和钢有良好的润湿能力，以保证良好的流动性和渗透性。

② 钎料的熔点要求尽可能低，以减少焊后应力，防止产生裂纹。

③ 钎料中应尽可能不含低熔点的元素，以免在加热时因元素蒸发而影响接头质量或有害人健康。与 Ni 基钎料、Cu 基钎料相比，Ag 基钎料熔点低、润湿性好，更适合于作为制备盾构刀具的钎料。

(2) 钎焊工艺

综合考虑盾构刀具钎焊质量、温度控制、难易程度、操作方便性、生产效率及工装准备等因素，高频感应钎焊较适合于形状复杂的盾构刀具的大面积钎焊。

将选用的 Ag 基复合钎料片放置于硬质合金和钢基刀体之间，并敷上钎剂，进行高频感应钎焊，因为高频加热速度很快，可以在很短时间内加热到钎焊温度，使 Ag 基钎料熔化并均匀分布于硬质合金表面和钢体表面，获得良好的连接效果，且可以有效地防止裂纹的产生。

8.6.6 矿用截齿的感应钎焊

矿用截齿是采煤机、掘进机和破碎机等采掘机械滚筒上直接切割煤炭的关键部件，该部件是齿体、齿尖组成的连接结构，钎焊强度直接影响截齿寿命。由破碎机理可知，截齿在采煤过程中由于工况恶劣，承受压缩、弯曲和冲击等复杂的合力作用，齿尖脱落现象十分严重。

(1) 焊前准备

① 检查每一个硬质合金表面，其表面必须平整，以保证合金与钎焊基体有良好的接触，保证钎焊质量。

② 对硬质合金进行喷砂处理，去除其表面的氧化膜，改善润湿性能。最好不用化学法研磨或电解法研磨，避免由于硬质合金表面层的黏结剂——钴被腐蚀而影响钎焊质量。

③ 采用超声波清洗仪，对硬质合金、钎剂、被焊基体进行清洗，彻底洗掉表面油污及锈渍，最后烘干。

(2) 钎焊工艺

钎料选择圆片状的 Cu56ZnMnCo, 该钎料强度高, 与硬质合金的结合性好, 用于石油钻头的钎焊。钎剂选用脱水硼砂。采用高频感应钎焊进行矿用截煤齿刀具的钎焊。由于 Cu56ZnMnCo 钎料的液相线为 909℃, 钎焊温度控制在 940~960℃, 这时钎料的流动性、渗透性较好。

(3) 焊后质量检验

使用超声波探伤仪检测钎缝处有无气孔, 检查被焊工件有无裂纹。对已检查出有缺陷的工件, 可重新加热钎焊, 但也应尽量减少重焊次数, 以免硬质合金因反复加热而影响质量。对于已产生裂纹的工件, 应在分析原因后将有裂纹的硬质合金取下, 重新钎焊。

8.7 在其他行业中的应用

8.7.1 低温医疗设备探针的感应钎焊

冷冻治疗探针是低温外科设备的关键器件, 特别是用于治疗人体腔内脏器疾患的治疗探针。在手术过程中, 探针通常需与人体非冷冻组织紧密接触。为保护正常组织免受冷冻伤害, 探针的探杆部分(非冷冻工作区)必须具有可靠的绝热性能。由于探杆直径纤细, 一般小于 6mm, 所以其绝热方式只能采用高真空隔层加以实现。为获得并维持探杆隔层空间的高真空度, 必须保证治疗探针金属组件连接的质量, 通常的铜基钎料钎焊、银基钎料钎焊以及钎弧焊易氧化, 还可能存在肉眼无法看到的小孔和氧化物等其他杂质, 即使连接的密封性达到要求, 由于存在氧化物及其他杂质的材料放气, 真空隔层也无法维持较长时间的高真空度。采用氢气(H₂)保护, 在玻璃钟罩内将治疗探针的金属组件进行高频感应钎焊, 可以实现真空隔层可靠的密封性, 并能维持较长时间(3年以上)的高真空度。另外, 金属组件在高频钎焊前, 对这些材料的清洗和镀镍层等预处理, 也是十分重要的工作环节。

(1) 焊前处理

由于低温治疗探针的探杆部分(非冷冻工作区)要求具有可靠的绝热性能, 因此其真空隔层的金属组件在钎焊前的预处理十分重要。预处理工艺主要包括两部分, 一是金属的清洗工艺; 二是金属镀镍层工艺。对待钎焊的金属组件进行清洗可保证连接的质量和延长使用寿命。清洗彻底不仅能提高钎焊的致密性, 还可减少金属组件在使用过程中的材料及杂质的放气, 从而延长隔层空间高真空度的时间。

① 先将金属组件放置在玻璃容器中, 倒入丙酮浸泡约 5min, 然后取出放入超声波发生器中清洗 5~10min, 取出后用风吹干(超声波发生器使用时需预热 3min)。

② 配制浓度为 20% 的 NaOH 水溶液 200mL, 将金属组件全部浸泡在碱液玻璃容器中, 煮沸约 5min, 然后取出用水冲洗。仔细检查去油污后的金属组件表面是否完全被水浸润, 如尚存油迹等, 则应重新清洗。

③ 酸液清洗的目的主要是除去待焊金属组件表面的氧化物, 先行配制酸洗液 200mL, 酸洗液组分为: H₂O100mL, HNO₃(浓) 50mL, H₂SO₄(浓) 50mL, NaCl 0.4g, NaNO₂ 0.2g。将已去油污后的金属组件完全浸没在上述酸洗液中, 10~15s 后取出, 立即用水冲洗 5min, 然后用无水乙醇脱水, 热风吹干后用清洁纸包好待电镀。

(2) 金属表面镀镍处理

为保证金属组件钎焊的质量, 还需将已清洗干净的金属组件表面进行镀镍处理。先将金属组件用铜丝扎住, 用去离子水浸洗, 然后带水吊入电镀槽内进行电镀。在室温下进行电镀大约 30min, 然后将金属组件取出用水冲洗干净, 并用无水乙醇脱水再吹干, 放入干燥器皿

内待钎焊。

(3) 钎焊工艺

金属组件的高频感应钎焊必须严格按操作规范实施。

① 先将氢气发生设备预热，处于备用状态，用镊子将待焊的金属组件固定，然后用银焊丝（72Ag-Cu）在待焊处缠绕1~2圈，将负载线圈提升至包围金属组件的位置。

② 用玻璃钟罩罩住待焊金属组件，并向钟罩内通入已准备的氢，等待钟罩内充满氢气。

③ 开启高频感应炉，同时接通冷却水，对振荡管和高频感应线圈进行冷却，在氢气的保护下对金属组件进行加热，使银焊丝熔化填满焊缝，保温约半分钟，然后关闭高频炉降温冷却。

④ 停止通入氢气，熄火后取出已完成钎焊的金属组件。

8.7.2 真空保温杯的真空钎焊

不锈钢真空保温杯（简称真空杯）如图8.49所示，按其生产方式不同，可简单地分为有尾真空杯和无尾真空杯两种。

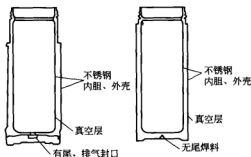


图8.49 不锈钢真空杯（有尾、无尾）

有尾真空杯是用真空排气台方式获得的，在真空排气台上，插上真空杯（真空杯底部焊着排气管），抽到小于 2×10^{-3} Pa真空度后，用液压钳压扁铜管，再用电烙铁软钎焊密封铜管口。

无尾真空杯是在真空钎焊炉中，通过真空钎焊制造的。钎焊在真空钎焊炉中进行，钎料为镍基粉末钎料或非晶态钎料，目前用得较多的是BNi82CrSiB非晶态钎料。装配前，将非晶箔带冲压成环状（周围呈波纹形，波纹高0.8mm）钎料片，当炉内真空度达到 6×10^{-4} Pa时，开始进行加热。当炉温达到钎料熔化温度（970~1000℃）时，钎料熔化，使堵盖下沉并焊封真空杯底部的抽气口。当炉温达到1050℃时，保温5min，将真空杯送入冷却室。当杯温降至800℃左右时，充高纯氮气速冷至100℃以下，取出真空杯。

无尾真空杯每炉可生产600个，24h可生产8000个以上，生产率比有尾真空杯高很多，并大大提高了真空杯质量，使真空杯使用寿命由有尾真空杯的8年提高到12年。目前国内各种真空杯、真空保温瓶和真空提锅已有50多个系列、上百个品种。

无尾真空杯每炉可生产600个，24h可生产8000个以上，生产率比有尾真空杯高很多，并大大提高了真空杯质量，使真空杯使用寿命由有尾真空杯的8年提高到12年。目前国内各种真空杯、真空保温瓶和真空提锅已有50多个系列、上百个品种。

无尾真空杯每炉可生产600个，24h可生产8000个以上，生产率比有尾真空杯高很多，并大大提高了真空杯质量，使真空杯使用寿命由有尾真空杯的8年提高到12年。目前国内各种真空杯、真空保温瓶和真空提锅已有50多个系列、上百个品种。

8.7.3 内燃机车叶轮的炉中钎焊

液力传动内燃机车是通过传动装置——液力变扭器来传递功率的。液力变扭器是液力传动的基本元件之一，它主要是由变扭器中的至少3个带叶片的叶轮（即泵轮、涡轮和导向轮）组成。因此，变扭器的功率主要取决于叶轮的质量。

液力传动内燃机车的液力变扭箱中的发动机轴通过工作液体与工作机械之间传递能量，工作叶轮大部分都是由机加工后经钎焊而成。将叶轮上、下两部分叶片钎焊而成的工艺，称为叶轮的钎焊工艺。由于工作叶轮需要承受较大的转矩，是液力传动内燃机车实现功率传递的基本元件之一，因此，叶轮连接质量的好坏将直接影响整台机车的使用性能，不可忽视。

(1) 钎焊技术要求

① 叶轮钎焊表面粗糙度应小于 $Ra 3.2 \mu m$ 。因为工件表面粗糙容易使钎剂流失，降低钎缝强度，对变扭器功率造成一定的损失。

② 装配间隙应小于 0.05mm, 间隙太大则钎料不能完全填充, 形成空隙, 影响钎缝质量。

③ 钎料形状大小应合理, 以保证叶轮钎缝表面完全焊牢。

④ 钎焊温度应严格控制, 以保证焊片完全熔化而不流失。

(2) 钎料的选择

选用银基钎料 313, 其成分为 Ag50%、Cu15.5%、Zn16.5%、Cd18%, 熔化温度范围为 625~635℃。钎剂选用硼砂、硼酸、氟化钾混合物, 即将 3 种材料烘干、研碎、过筛后按一定比例混合, 放入酒精中待用。

(3) 钎焊工艺

将机加工后符合要求的叶轮清洗干净, 正确放入钎料、钎剂, 放在专用钎焊夹具上, 拧紧螺母, 并保证热电偶位置适当。必须注意, 叶轮装配、上料到进入钎焊炉内的时间间隔不得超过 2h, 以防止钎剂中酒精挥发, 达不到保护钎料的作用。

叶轮的钎焊加热炉选用带风扇的井式炉, 装炉过程应使叶轮放在有效加热区内, 风扇开启后保证加热均匀, 一般加热炉定温在 670~680℃。叶轮钎焊温度用电子电位差计控制, 将测量用热电偶一端与叶轮叶片相连, 一端连在电子电位差计上, 精确测量叶片升温情况, 当温度达到银片熔化温度时 (一般在 667~669℃之间), 立即将叶轮吊出炉膛, 置于 180℃ 炉内保温 1~2h 后吊出空冷。

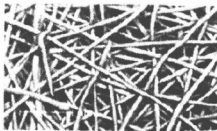


图 8.50 316L 金属过滤毡结构 (×400)

8.7.4 不锈钢过滤毡的钎焊

过滤毡材料已经由毛毡、无纺布等逐渐向金属过滤毡方向发展。在医药、环保和电子工业, 尤其是在石油化工和轻纺化纤行业中, 高精度不锈钢过滤毡的应用范围越来越广泛。以石油化工生产中常用的 316L 高精度不锈钢过滤毡为例, 其结构如图 8.50 所示。

(1) 钎焊材料的选择

316L 高精度不锈钢过滤毡钎焊用钎料、钎剂的选择如表 8.6 所示。

表 8.6 不锈钢过滤毡钎焊材料

钎料	钎焊温度/℃	钎剂	钎焊工艺
Sn	232	RJ5	软钎焊
S-Sn97Ag	250	RJ5	软钎焊
S-Sn90Pb	220	RJ5	软钎焊
B-Ag50CuZnCd	650	YJ7	硬钎焊
B-Ag50CuZnSnNi	680	YJ7	硬钎焊

(2) 金属过滤毡的软钎焊

采用 Sn、S-Sn97Ag 和 S-Sn90Pb 三种钎料与 RJ5 钎剂相配合, 用 150W 电烙铁钎焊以后, 润湿良好。金属过滤毡软钎焊时, 在搭接长度为 4δ (δ 为搭接接头中最小板厚) 情况下能满足接头强度要求和生产工艺要求: 钎料填满了过滤毡的空隙, 使接头完好地连接在一起。

经拉伸试验后得到的钎焊接头的平均剪切强度分别为 31.1MPa、32MPa、31.2MPa,

强度均能满足生产要求。

(3) 金属过滤毡的炉中钎焊

采用 B-Ag50CuZnCd 和 B-Ag50CuZnSnNi 钎料与 YJ7 钎剂相配合, 使用 Ar 气作保护气体, 在改造后的 RX2-14-13 箱式电阻加热炉中加热至 650℃, 钎焊以后得到的接头润湿情况良好。采用 B-Ag50CuZnCd 和 B-Ag50CuZnSnNi 钎料制备搭接接头试件经拉伸试验后, 得到的钎焊接头平均剪切强度分别为 37.2MPa、38.5MPa, 也达到生产要求。

8.7.5 眼镜架的感应钎焊

国内眼镜架材料主要有黄铜、白铜、蒙乃尔合金、不锈钢和钛镍记忆合金等。其中钛镍记忆合金性能最好, 但价格昂贵。不锈钢眼镜架与黄铜、白铜眼镜架材质相比, 具有耐腐蚀、强度高、弹性好等特点。一般不锈钢眼镜架由框架、横梁、支架、弯头、镜腿等部件构成。

通常一副眼镜架有 8~14 个钎焊焊点。眼镜架及其配件小, 结构复杂, 许多焊点的接触面积远小于 1mm², 平均每个焊点仅需钎料 0.01g 左右, 同时要求钎焊接头强度高、钎缝应美观。

眼镜架钎焊通常采用电阻钎焊或小功率的高(中)频感应钎焊。不锈钢眼镜架电阻钎焊用钎料主要是银铜锌基钎料, 如 HL322 (40Ag25Cu30.5Zn3Sn1.5Ni) 和 HL324 (50Ag22Cu26.5Zn1Sn0.5Ni)。钎剂选择 QJ103 银钎剂。

钎焊前, 不锈钢零件应进行酸洗, 选用的酸洗液为 HNO₃ 10%(质量分数)+H₂SO₄ 6%(质量分数)+HF50g/L 的水溶液。酸洗温度和时间分别为 20℃、10min。酸洗后用 60~80℃ 的热水清洗残液, 并迅速在 60~80℃ 的热空气中干燥。钎焊眼镜架时应采用专用夹具, 以免钎料在凝固过程中与被焊的眼镜架产生颤动。

参 考 文 献

- [1] 赵越等编著. 钎焊技术及应用. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [2] 任耀文编著. 真空钎焊工艺. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [3] 郭万林, 刘昌星. GH188 合金的扩散钎焊. 材料工程, 2001, 211-212, 203.
- [4] 马天军, 康慧, 曲平. TC4 合金真空钎焊的发展. 焊接技术, 2004, 33 (5): 4-6.
- [5] 姜虹, 张礼敬, 杨静. 不锈钢真空钎焊. 真空, 2004, 41 (3): 65-68.
- [6] 张以忱. 真空工程用焊接技术. 真空, 2007, 44 (2): 62-64.
- [7] 程建平, 张红梅. 高温真空钎焊设备的研制. 电子工艺技术, 2010, 31 (1): 48-50.
- [8] 张启运, 庄鸿寿. 钎焊手册. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [9] 李亚江. 轻金属焊接技术. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [10] 张学军主编. 航空钎焊技术. 北京: 航空工业出版社, 2008.
- [11] 李京龙, 李锋, 熊江涛, 张赋升, 王忠平, 孙福, 王艳芳. Ti-6Al-4V 钛合金板与 304L 不锈钢网的扩散焊. 机械科学与技术, 2006, 25 (3): 301-304.
- [12] 熊江涛, 李京龙等. TA3 多层板及 TA3+TC4 真空扩散焊. 航天制造技术, 2002, (4): 10-13.
- [13] 孙国平, 程全文, 张小奇, 张斌. 陶瓷与金属钎的真空扩散焊工艺. 焊接技术, 2005, 34 (6): 31-32.
- [14] 刘黎明, 高振坤, 董长富, 韩文波. 亚微米级 (Al_2O_3)p/6061Al 铝基复合材料扩散焊工艺. 焊接学报, 2004, 25 (5): 85-88.
- [15] 熊江涛, 张赋升, 李京龙, 黄为东. 镁合金与钛合金的瞬间液相扩散焊. 稀有金属材料与工程, 2006, 35 (10): 1677-1680.
- [16] 毛唯, 李晓红, 周媛, 叶雷, 陈波, 吴欣, 程耀永. DD3 单晶合金 TLP 扩散焊接头的高温拉伸性能和持久性能. 焊接, 2008, (3): 28-31.
- [17] 孙国平, 程全文, 张小奇, 张斌. 陶瓷与金属钎的真空扩散焊工艺. 焊接技术, 2005, 34 (6): 31-32.
- [18] 周彦彬, 陈春焕, 潘金芝, 任瑞铭. 冷作模具钢与弹簧钢的真空扩散焊. 焊接技术, 2008, 37 (2): 27-29.
- [19] 王学刚, 王黎明, 严黔, 李辛庚. 石油钻杆的瞬间液相扩散焊技术研究. 石油机械, 2005, 33 (11): 34-37.
- [20] 陈思杰, 井晓天, 李辛庚. TP304 钢管的瞬间液相扩散焊工艺研究. 热加工工艺, 2004, (11): 58-60.
- [21] 张赋升, 熊江涛, 李京龙, 孙福西. 中国机械工程学会焊接学会编. 第十一次全国焊接会议论文集, 第 1 册, 2005: 105-108.
- [22] 李亚江, 吴会强, 陈茂爱等. Cu/Al 真空扩散焊接头显微组织分析. 中国有色金属学报, 2001, 11 (3): 424-427.
- [23] Li Yajiang, Wang Juan, Liu Peng et al. Microstructure and XRD analysis near the interface of Ti/Al diffusion bonding. Journal for the Joining of Materials, 2005, 17 (2): 53-57.
- [24] 刘鹏, 李亚江, 王娟等. Mg/Al 异种材料真空扩散焊界面区域的显微组织. 焊接学报, 2004, 25 (5): 5-8.
- [25] Liu Peng, Li Yajiang, Geng Haoran and Wang Juan. A Study of phase constitution near the interface of Mg/Al vacuum diffusion bonding. Materials Letters, 2005, 59 (16): 2001-2005.
- [26] Liu Peng, Li Yajiang, Geng Haoran and Wang Juan. Investigation of interfacial structure of Mg/Al vacuum diffusion-bonded joint. Vacuum, 2006, 80 (5): 395-399.
- [27] Liu Peng, Li Yajiang, Geng Haoran, Wang Juan, Ma Haijun and Guo Guolin. Microstructure and phase constituents in the interface zone of Mg/Al diffusion bonding. Metallurgical and Materials Transactions B, 2006, 37 (4): 649-654.
- [28] 刘鹏, 李亚江, 王娟, 耿浩然. Mg/Al 异种材料真空扩散焊界面区域的显微组织. 焊接学报, 2004, 25 (5): 5-8.
- [29] 刘鹏, 李亚江, 耿浩然, 王娟. Mg/Al 异种金属的焊接研究现状. 焊接技术, 2006, 35 (2): 1-3.
- [30] Peng Liu, Yajiang Li, Juan Wang and Jishi Guo. Vacuum brazing technology and microstructure near the interface of Al/18-8 stainless steel. Materials Research Bulletin, 2003, 38 (9-10): 1493-1499.
- [31] 刘鹏, 李亚江, 王娟, 郭国林, 郭继石. Al/18-8 钢真空钎焊工艺及界面组织结构. 焊接, 2004, (1): 11-14.
- [32] Li Yajiang, Wang Juan, Liu Peng and Ren Jiangwei. Microstructure and XRD analysis near the interface of Ti/Al diffusion bonding. International Journal for the Joining of Materials, 2005, 17 (2): 53-57.
- [33] E. R. Naimon, J. H. Dolye, C. R. Rice, D. Vigil and D. R. Walmsley. Diffusion welding of aluminum to stainless steel. Welding Journal, 1981, 60 (11): 17-20.
- [34] Ren Jiangwei, Li Yajiang and Feng Tao. Microstructure characteristics in the interface zone of Ti/Al diffusion bonding. Materials Letters, 2002, 56 (5): 647-652.

- [35] N. Orban, T. I. Khan and M. Eroglu. Diffusion bonding of Micro duplex stainless steel to Ti-6Al-4V. Scripta Materialia, 2001, 45 (3): 441-446.
- [36] 沈惠塘编著. 焊接技术与高招. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [37] 刘秀芳, 蒲一民, 首鸿燕. 扩压器钎焊工艺. 航天制造技术, 2007, 4: 24-26.
- [38] 岳香山, 耿阳小龙, 侯金保, 丁立民. 钛合金蜂窝壁板结构钎焊工艺. 航空制造技术, 2009, (10): 96-98, 105.
- [39] 李海刚, 毛建英, 宁立芹. 7715D 钛合金喷注器钎焊工艺研究. 第九次全国焊接会议论文集, 1: 75-78.
- [40] 杜静, 相似, 张德权等. 发动机低压涡轮叶片锯齿冠耐磨片的钎焊. 焊接, 2010, 1: 61-64.
- [41] 关宏背, 王善康. 某机涡轮工作叶片真空钎焊工艺研究. 热加工工艺, 2006, 35 (7): 78-79.
- [42] 李世杰. 百万千瓦核电发电机钎焊工艺的开发经验. 上海中大型电机, 2011, 3: 31-33.
- [43] 王晓敏, 王桥. 大型发电机定子绕组线棒中频感应钎焊工艺分析. 焊接技术, 2009, 38 (11): 34-36.
- [44] 徐波, 史文卿, 黄春阳. 一台 500MW 汽轮发电机水内冷和钎焊工艺的研究. 大电机技术, 2006, 1: 8-9.
- [45] 吴杰锋, 张勇, 姚为民. HT-7 装置纵场线圈超导接头头的钎焊工艺. 焊接, 2003, 7: 29-30.
- [46] 姜怀武, 刘洁. 电站汽轮机顶轴油管火焰钎焊工艺实践. 第十六届全国钎焊及特种连接技术交流会论文集, 2008: 298-300.
- [47] 罗菲. 水轮发电机定子线圈端部钎焊及绝缘工艺探析. 装备制造技术, 2011, 9: 96-97.
- [48] 苏策. 大型汽车用热交换器埋丝钎焊新工艺. 焊接技术, 2010, 39 (4): 30-32.
- [49] 杜学铭, 邹泽明, 张旭明, 陈冰泉. 汽车转向油罐钎焊工艺的研究. 焊接技术, 2001, 30 (1): 14-15.
- [50] 周斌. 换热器铜管钎焊工艺. 化工工程与装备, 2010, 8: 96-98.
- [51] 肖兵. 高频感应钎焊在基准轴上的应用. 热加工工艺, 2009, 38 (19): 155-156.
- [52] 齐嘉华, 凌泽民, 郭艳, 刘怀玉. 铝制油冷器真空钎焊接头缺陷特征及分析. 热加工工艺, 2011, 40 (1): 163-165.
- [53] 寸晓红. 某雷达收发箱真空铝焊工艺研究. 火控雷达技术, 2003, 32 (2): 39-41, 63.
- [54] 金家富, 胡俊. Ku 波段微带天线低温钎焊工艺. 热加工工艺, 2011, 40 (17): 155-156.
- [55] 杨雄, 刘昌明, 吴文秀. 测井陶瓷真空扩散钎焊工艺正交化试验. 热加工工艺, 2008, 37 (21): 123-125.
- [56] 冯祥秩, 王新彦. 硬质合金刀具的钎焊. 热加工工艺, 2009, 38 (5): 138-139.
- [57] 丁天然, 龙伟民, 于新泉等. 金刚石薄壁钻钎焊工艺. 焊接技术, 2011, 40 (6): 55-57.
- [58] 王晓军. 聚晶金刚石车刀钎焊工艺研究. 制造技术与机床, 2005, (8): 94-95.
- [59] 侯克忠, 白家声, 盛林峰, 孙继辉. 盾构掘进机用特种刀具的研究与制备. 硬质合金, 2009, 26 (1): 24-28.
- [60] 中国机械工程学会等. 中国材料工程大典: 第 22、23 卷 (史耀武主编. 材料焊接工程). 北京: 化学工业出版社, 2006
- [61] 陈建云. 浅谈矿用截齿钎焊工艺的改进. 凿岩机械气动工具, 2011, (1): 31-32.
- [62] 章忠敏, 姜红强, 孔庆豪等. 低温外科设备治疗探针高频钎焊研究. 低温与超导, 2011, 39 (8): 15-17.
- [63] 刘亦兵, 赖康生, 安永印, 彭韩. 真空保温杯与真空钎焊炉. 真空, 2006, 43 (2): 54-55.
- [64] 常云. 浅谈内燃机车叶轮的钎焊工艺. 城市车辆, 2002, (3): 48.
- [65] 丁启敏. 一种不锈钢过滤毡钎焊方法. 石油化工高等学校学报, 2004, 17 (2): 64-67.
- [66] 朱坤, 龙伟明, 刘文明, 王海滨. 不锈钢-白铜眼镜架钎焊工艺的改进. 焊接, 2002 (6): 39-40.
- [67] 刘文明, 龙伟民, 钟家明. 不锈钢眼镜架的钎焊. 焊接技术, 2004, 33 (3): 29-30.